



Ricardo Jorge Alves Piló

(Licenciado em Engenharia Civil)

**Análise qualitativa dos valores de cálculo
utilizados para efeitos da avaliação do impacto
das pontes térmicas lineares no desempenho
energético dos edifícios residenciais**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Reabilitação de Edifícios

Orientador: Prof. Doutor Daniel Aelenei

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues
Arguente: Eng.^a Susana Maria Lasbarrères Camelo
Vogal: Prof. Doutor Daniel Aelenei



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Dezembro 2012

Copyright © Ricardo Jorge Alves Piló, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor

Agradecimentos

Não poderia dar por concluído este trabalho sem agradecer a todos aqueles, que de alguma forma, contribuíram, directa ou indirectamente, para o seu desenvolvimento, em particular:

Ao Professor Doutor Daniel Aelenei, meu orientador científico, pelo constante acompanhamento, disponibilidade, dedicação e acima de tudo, pelo conhecimento partilhado ao longo de todos estes meses.

A todos os meus amigos, que me apoiaram e incentivaram ao longo da realização desta dissertação. Um agradecimento especial ao Tiago Correia, pela ajuda preciosa na utilização do programa de análise numérica utilizado no presente trabalho.

À minha amiga e namorada, Telma Silva, pelo constante incentivo, carinho e compreensão que me deu ao longo da elaboração deste trabalho, face a uma menor disponibilidade nos últimos tempos.

Para finalizar, quero expressar o meu sincero agradecimento à minha família, em particular aos meus pais, Isabel e José Artur, e à minha irmã Denise, não só por terem acreditado no meu trabalho e respeitado as pausas e ausências durante a sua realização, mas sobretudo, pelo sólido suporte familiar proporcionado ao longo do meu percurso académico e pessoal.

Resumo

No contexto actual em que a eficiência energética nos edifícios é um tema de importância crescente na Europa, as pontes térmicas dos edifícios ganham uma importância vital na medida em que as perdas de calor originadas pela sua existência podem ser significativas. Como tal, a análise higrotérmica das zonas de pontes térmicas é essencial para identificar formas de reduzir o seu impacto, contribuindo desta forma para a eficiência energética dos edifícios e para a melhoria do conforto higrotérmico dos utentes.

Nas zonas de pontes térmicas, a resistência térmica é inferior à da zona corrente e os valores das temperaturas superficiais interiores são, em geral, mais baixos. Em determinados pontos localizados, tais temperaturas podem atingir valores críticos e conduzir ao aparecimento de anomalias frequentemente detectadas e identificadas no presente trabalho. A menor resistência térmica das zonas de pontes térmicas implica ainda perdas de calor mais elevadas do que as verificadas na zona corrente da envolvente.

A avaliação do impacto causado pelas pontes térmicas assenta actualmente num conjunto limitado de soluções construtivas utilizadas com maior frequência. Como tal, este trabalho pretende, para além da análise desses casos, incidir sobre situações que compreendem soluções de isolamento térmico de maior espessura. Para o efeito, utilizou-se uma ferramenta de simulação numérica, o programa BISCO, que permite uma análise das pontes térmicas semelhante à realidade.

Na sequência deste trabalho constata-se que os valores obtidos para o coeficiente de transmissão térmica linear vão ao encontro dos valores tabelados nas normas internacionais e nos regulamentos nacionais. Assim, verifica-se que a análise numérica cuidada permite estimar a influência das pontes térmicas lineares com grande precisão, podendo os valores do coeficiente de transmissão térmica linear servir de base à análise do comportamento térmico de edifícios.

Palavras-chave: Pontes térmicas, edifícios, análise numérica, BISCO.

Abstract

In the actual context where energy efficiency in buildings is an issue of growing importance in Europe, thermal bridges in buildings earn vital importance in that heat losses arising from their existence can be significant. So, hygrothermal analysis of thermal bridges zones is essential to identify ways to reduce their impact, consequently contributing to the energy efficiency of buildings and to improve the hygrothermal comfort of users.

In thermal bridges areas, the thermal resistance is lower than the current zone and the values of the internal surface temperatures are, generally, lowers. At certain located points, those temperatures can reach critical values and lead to the occurrence of frequently detected and identified anomalies in this study. Besides, the lesser thermal resistance of thermal bridges zones involves heat losses higher than those observed in the surrounding current area.

In this time, the impact evaluation caused by thermal bridges relies on a limited set of constructive solutions used more frequently. So, this study purposes, beyond the analysis of these cases, accent on situations that include greater thickness insulation. For this prupose, a numerical simulation tool was used, the BISCO program, which allows a thermal bridges analysis similar to reality.

Following this work it appears that the obtained values for the linear thermal transmittance meet the tabulated values in international and national regulations. Thus, it appears that the careful numerical analysis allows to estimate the influence of linear thermal bridges with great accuracy, whereby the linear thermal transmission provide the basis for analysis of buildings thermal behaviour.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação e enquadramento do tema	1
1.2 Objectivos	3
1.3 Plano de trabalho.....	3
2. PONTES TÉRMICAS: CONCEITO, CLASSIFICAÇÃO E ANOMALIAS	5
2.1 Conceito.....	5
2.2 Classificação.....	6
2.3 Anomalias	7
2.3.1 Agravamento do risco de ocorrência de condensações superficiais. Método de avaliação	8
2.3.2 Desenvolvimento de bolores	10
2.3.3 Degradação dos revestimentos.....	11
2.3.4 Heterogeneidade de temperaturas.....	12
3. ANÁLISE HIGROTÉRMICA: MÉTODOS DE AVALIAÇÃO	13
3.1 Análise do fenómeno em termos de transferência de calor	13
3.1.1 Transferência de calor em elementos construtivos homogéneos.....	13
3.1.2 Transferência de calor em elementos construtivos heterogéneos	14
3.2 Métodos experimentais	18
3.2.1 Análise em condições reais.....	18
3.2.2 Análise em laboratório.....	21
3.3 Métodos numéricos e simplificados. Determinação do coeficiente de transmissão térmica linear ψ	22
3.3.1 Métodos de cálculo numérico.....	23
3.3.2 Valores convencionais de projecto.....	25
3.3.3 Outros catálogos de pontes térmicas.....	26
3.3.4 Métodos de cálculo manual.....	27
4. METODOLOGIAS DE CÁLCULO ADOPTADAS PELA REGULAMENTAÇÃO EUROPEIA E PORTUGUESA	29
4.1 Quantificação das perdas de calor através das pontes térmicas pela Norma Europeia EN ISO 14683 (2007).....	29
4.2 Quantificação das perdas de calor através das pontes térmicas pelo RCCTE (2006)	31
4.2.1 Parâmetros de caracterização	31
4.2.2 Requisitos mínimos regulamentares.....	32

4.2.3 Requisitos energéticos	33
4.2.4 Metodologia de cálculo. Determinação das perdas térmicas através das pontes térmicas.....	33
4.2.5 Coeficientes de transmissão térmica linear ψ	35
5. ANÁLISE NUMÉRICA DE PONTES TÉRMICAS	37
5.1 Breve descrição do programa de cálculo automático utilizado. Input	37
5.2 Propriedades térmicas calculadas pelo programa. Output	38
5.2.1 Cálculo do fluxo de calor em zona de ponte térmica (Q)	38
5.2.2 Cálculo das restantes propriedades térmicas (f_{Rsi} , ψ).....	39
5.3 Análise de possíveis correcções em zona de ponte térmica	39
5.3.1 Soluções de parede consideradas	41
5.3.2 Propriedades dos materiais.....	42
5.3.3 Condições de fronteira	44
5.3.4 Análise comparativa entre os resultados obtidos pelo BISCO e os valores regulamentares de ψ que constam no RCCTE (2006) e na EN ISO 14683 (2007)	45
5.3.5 Análise dos valores obtidos pelo BISCO para o factor de temperatura superficial (f_{Rsi})	87
5.3.6 Valores de ψ e de f_{Rsi} obtidos para as soluções de pontes térmicas consideradas	91
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	93
6.1 Principais conclusões.....	93
6.2 Desenvolvimentos futuros	95
BIBLIOGRAFIA.....	97

Índice de Quadros

Quadro 2.1 - Valor mínimo do factor de temperatura superficial para precaver o fenómeno de condensação (RODRIGUES et al. 2009)	9
Quadro 2.2 - Valor mínimo do factor de temperatura superficial para precaver o fenómeno de condensação de acordo com (Kalamees, 2006)	9
Quadro 3.1 – Métodos disponíveis para calcular o coeficiente de transmissão térmica linear ψ (Wouters et al. 2003)	22
Quadro 5.1 – Condutibilidade térmica dos diferentes materiais, reais ou equivalentes, considerados na análise numérica	43
Quadro 5.2 – Resistências e condutâncias térmicas superficiais adoptadas na análise das pontes térmicas	44
Quadro 5.3 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Ar1	46
Quadro 5.4 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Ar2	47
Quadro 5.5 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Ar3	48
Quadro 5.6 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Ar4	49
Quadro 5.7 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Ar5	50
Quadro 5.8 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de ar - P.T.Ar6	51
Quadro 5.9 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.Ae1	53
Quadro 5.10 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede simples com isolamento pelo interior - P.T.Ai1	55
Quadro 5.11 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede simples com isolamento pelo interior - P.T.Ai2	56
Quadro 5.12 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Br1	58
Quadro 5.13 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Br2	59
Quadro 5.14 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Br3	60
Quadro 5.15 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Br4	61
Quadro 5.16 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.Be1	62

Quadro 5.17 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede simples com isolamento pelo interior - P.T.Bi1	64
Quadro 5.18 – Ligação da fachada com varanda - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Cr1	65
Quadro 5.19 – Ligação da fachada com varanda - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Cr2	66
Quadro 5.20 – Ligação da fachada com varanda - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Cr3	67
Quadro 5.21 – Ligação da fachada com varanda - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Cr4	68
Quadro 5.22 – Ligação da fachada com varanda - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.Ce1.....	70
Quadro 5.23 – Ligação da fachada com varanda - parede simples com isolamento pelo interior - P.T.Ci1.....	71
Quadro 5.24 – Ligação entre duas paredes verticais - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Dr1	72
Quadro 5.25 – Ligação entre duas paredes verticais - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Dr2	73
Quadro 5.26 – Ligação entre duas paredes verticais - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Dr3	74
Quadro 5.27 – Ligação entre duas paredes verticais - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Dr4	75
Quadro 5.28 – Ligação entre duas paredes verticais - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.De1.....	77
Quadro 5.29 - Ligação entre duas paredes verticais - parede simples com isolamento pelo interior - P.T.Di1.....	78
Quadro 5.30 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Er1.....	80
Quadro 5.31 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Er2.....	81
Quadro 5.32 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Er3.....	82
Quadro 5.33 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Er4.....	83
Quadro 5.34 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.Ee1.....	84
Quadro 5.35 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.Ei1	86
Quadro 5.36 – Valores de factor de temperatura superficial - ligação da fachada com pavimentos intermédios	88

Quadro 5.37 – Valores de factor de temperatura superficial - ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço	88
Quadro 5.38 – Valores de factor de temperatura superficial - ligação da fachada com varanda.....	89
Quadro 5.39 – Valores de factor de temperatura superficial - ligação entre duas paredes verticais ...	90
Quadro 5.40 – Valores de factor de temperatura superficial - pilares inseridos em zonas correntes ..	90
Quadro 5.41 – Valores de ψ e de f_{Rsi} para as soluções de pontes térmicas consideradas.....	91

Índice de Figuras

Figura 1.1 – Taxa de dependência energética (%) no período 2005-2011 (DGEG, 2012)	1
Figura 1.2 – Consumo de energia primária em Portugal no ano de 2011 (DGEG, 2012)	2
Figura 1.3 – Consumo de energia final em Portugal no ano de 2011 (DGEG, 2012)	2
Figura 2.1 – Exemplo de ponte térmica linear entre duas paredes verticais. a) Linhas isotérmicas de temperatura. b) Linhas de fluxo de calor.....	5
Figura 2.2 – Ponte térmica provocada por um pilar inserido na envolvente (Freitas, 2007)	7
Figura 2.3 – Pontes térmicas devido à existência de materiais de diferentes condutibilidades térmicas na ligação da fachada com a cobertura	7
Figura 2.4 – Pontes térmicas devido à existência de materiais de diferentes condutibilidades térmicas na ligação da fachada com pavimentos intermédios	7
Figura 2.5 – Condensações superficiais (Engenharia Civil, 2012)	10
Figura 2.6 – Desenvolvimento de bolores em zona de ponte térmica.....	11
Figura 2.7 – Degradação do revestimento por descasque da pintura	12
Figura 2.8 – Manchas ou “fantasmas” na superfície interior da envolvente (Abreu, 2003)	12
Figura 3.1 – Transferência de calor através de elementos heterogéneos dos edifícios (Wouters et al. 2003).....	16
Figura 3.2 – Concentração do fluxo de calor devido ao efeito da ponte térmica (Wouters et al. 2003).....	16
Figura 3.3 – Corte por um plano XY (EN ISO 10211, 2007).....	17
Figura 3.4 – Corte tridimensional de uma ponte térmica em zona de cunhal (EN ISO 10211, 2007)..	17
Figura 3.5 – Termopares ao nível da superfície interior da ponte térmica (Corvacho, 1996)	19
Figura 3.6 – Fluxímetro (Corvacho, 1996)	19
Figura 3.7 – Câmara termográfica “ThermaCAM™ B4” (DeltaG, 2012).....	20
Figura 3.8 - Localização das pontes térmicas com recurso à termografia infravermelha (Aelenei, 2010)	20
Figura 4.1 - Esquema de um edifício que apresenta o tipo e a localização de pontes térmicas, de acordo com a tabela A.2 (EN ISO 14683, 2007).....	30
Figura 4.2 – Verificação do RCCTE (2006).....	33
Figura 5.1 – Janela de entrada do programa com abertura do ficheiro do pormenor construtivo (BISCO, 2006)	37
Figura 5.2 – Esquema gráfico de triangulação e distribuição de temperaturas ao nível do pormenor construtivo (BISCO, 2006).....	38
Figura 5.3 – Pormenores esquemáticos de soluções de parede dupla visando a correcção de pontes térmicas planas (Adaptado de Santos, 2007)	40
Figura 5.4 – Paredes duplas com isolamento na caixa-de-ar	41
Figura 5.5 – Paredes simples com isolamento pelo exterior	42
Figura 5.6 – Paredes simples com isolamento pelo interior	42
Figura 5.7 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ar1	47

Figura 5.28 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Dr1	73
Figura 5.29 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Dr2	74
Figura 5.30 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Dr3	75
Figura 5.31 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Dr4	76
Figura 5.32 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.De1	77
Figura 5.33 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Di1	79
Figura 5.34 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Er1	80
Figura 5.35 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Er2	81
Figura 5.36 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Er3	82
Figura 5.37 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Er4	83
Figura 5.38 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ee1	85
Figura 5.39 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ei1	86

LISTA DE ABREVIATURAS SIGLAS E SÍMBOLOS

SIGLAS	Designação
BMP	Extensão do ficheiro Bitmap
EN	Norma Europeia
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
EPS	Poliestireno expandido moldado
FPA	<i>Focal Plane Array</i>
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
IEA	International Energy Agency
ISO	<i>International Organization of Standardization</i>
LECA	<i>Light Weight Concrete Aggregates</i>
MDF	Método das diferenças finitas
MEF	Método dos elementos finitos
MVC	Método do volume de controlo
PIB	Produto Interno Bruto
RCCTE	Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios
RSECE	Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios
SCE	Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior
UE	União Europeia
UNL	Universidade Nova de Lisboa
XPS	Poliestireno expandido extrudido

Símbolos Latinos	Designação	Unidade
A	Área	m ²
c	Calor específico	J/kg.°C
e	Espessura	m
f _{Rsi}	Factor de temperatura superficial	-
g ₊	Factor solar do vão envidraçado	-
H	Coeficiente de transmissão térmica unitário	W/K
h	Condutância térmica superficial	W/m ² .°K
h _i	Condutância térmica superficial interior	W/m ² .°K
h _e	Condutância térmica superficial exterior	W/m ² .°K
l	Comprimento	m
N _a	Valor limite das necessidades de energia para a produção de águas quentes sanitárias	kWh/m ² .ano
N _{ac}	Necessidades nominais anuais de energia para produção de águas quentes sanitárias	kWh/m ² .ano

N_i	Valor limite das necessidades nominais de energia útil de aquecimento	kWh/m ² .ano
N_{ic}	Necessidades nominais anuais de energia útil para o aquecimento	kWh/m ² .ano
N_t	Valor limite das necessidades de energia primária	kWh/m ² .ano
N_{tc}	Necessidades globais de energia primária	kWh/m ² .ano
N_v	Valor limite das necessidades nominais de energia útil de arrefecimento	kWh/m ² .ano
N_{vc}	Necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento	kWh/m ² .ano
Q	Fluxo de calor	W/m ²
R	Resistência térmica	m ² .°K/W
R_{ph}	Número de renovações horárias do ar interior	h ⁻¹
R_{si}	Resistência térmica superficial interior	m ² .°K/W
R_{se}	Resistência térmica superficial exterior	m ² .°K/W
t	Tempo	s
U	Coeficiente de transmissão térmica	W/m ² .°C
x,y,z	Coordenadas espaciais num sistema de eixos ortogonais	m

Símbolos Gregos	Designação	Unidade
θ	Temperatura	°C
θ_e	Temperatura do ambiente exterior	°C
θ_i	Temperatura do ambiente interior	°C
θ_{si}	Temperatura superficial interior	°C
$\theta_{si,min}$	Temperatura superficial	°C
λ	Condutibilidade térmica	W/m.°C
ρ	Massa específica	kg/m ³
τ	Parâmetro adimensional	-
χ	Coeficiente de transmissão térmica pontual	W/K
ψ	Coeficiente de transmissão térmica linear	W/m.K

1. INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e enquadramento do tema

O nível e a qualidade de vida das populações e a actividade económica desenvolvida pelas empresas estão totalmente dependentes da energia, nas suas duas principais componentes: a electricidade e os combustíveis. Portugal não foge a esta realidade e a dependência energética é uma das principais fragilidades da sua economia. O actual cenário energético nacional é caracterizado por uma forte dependência externa, com um sistema energético fortemente dependente de fontes primárias de origem fóssil (petróleo, gás natural e carvão), e com uma procura energética com taxas de crescimento superiores às do crescimento do PIB (DGEG, 2012). Contudo, a taxa de dependência energética tem vindo a decrescer desde 2005, apesar de ter sofrido um ligeiro agravamento de 2007 para 2008 e de 2010 para 2011 (Figura 1.1).

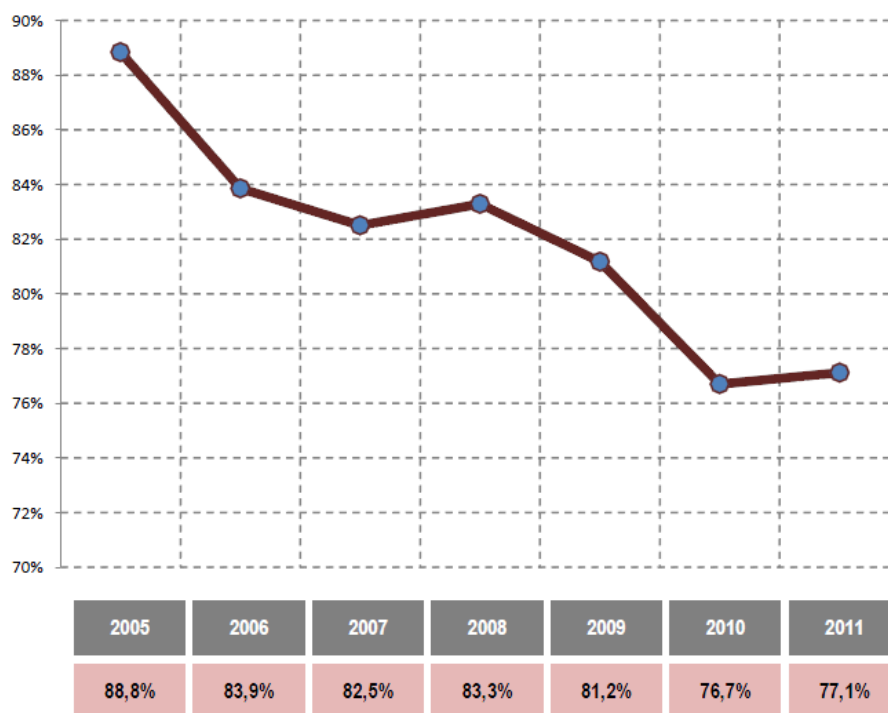


Figura 1.1 – Taxa de dependência energética (%) no período 2005-2011 (DGEG, 2012)

A utilização de combustíveis fósseis, para além de provocar importantes impactes ambientais, impõe a necessidade de reforçar a segurança energética, reduzindo a dependência das importações de matérias-primas do estrangeiro. No que se refere aos impactes ambientais, a UE pretende reduzir em 20% as emissões de gases com efeito de estufa até 2020, comparativamente aos níveis registados em 1990. Este objectivo visa promover a utilização de energias renováveis (solar, eólicas, biomassa, etc.) e limitar o consumo de energia, o que pressupõe o aumento da utilização dessas fontes e a redução do consumo, mediante um aumento da eficiência energética.

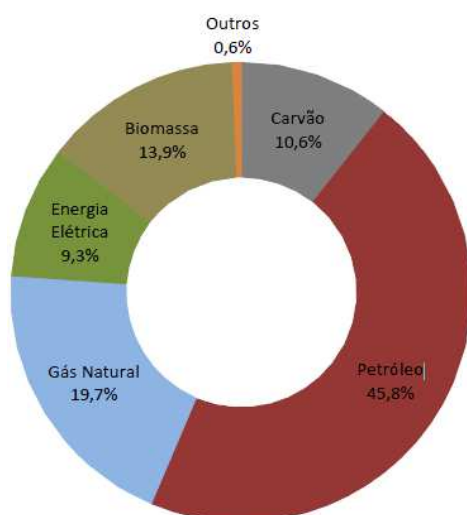


Figura 1.2 – Consumo de energia primária em Portugal no ano de 2011 (DGEG, 2012)

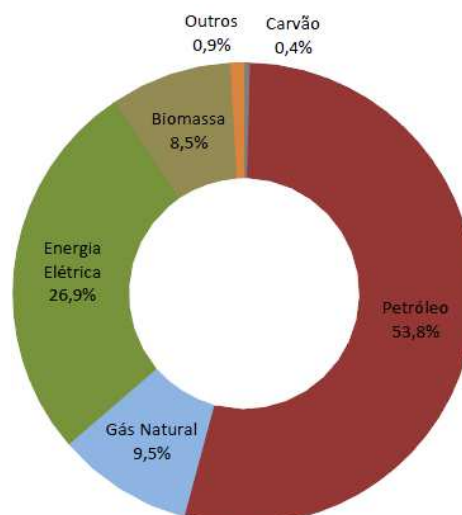


Figura 1.3 – Consumo de energia final em Portugal no ano de 2011 (DGEG, 2012)

Os edifícios são responsáveis pelo consumo de aproximadamente 40% da energia final na Europa e cerca de 30% para o caso de Portugal. A qualidade dos edifícios e as condições de conforto a eles associado têm aumentado ao longo do tempo, principalmente durante os últimos anos. As necessidades de higiene (casa de banho, esgotos, água quente e fria, etc.), as necessidades básicas (refrigeração, fogão, etc.), as necessidades de conforto térmico (aquecimento e arrefecimento), e ainda o uso de equipamentos de entretenimento (TV, sistemas de som, etc.) e equipamentos eléctricos de apoio às tarefas (computadores pessoais, electrodomésticos, etc.), são comodidades que vêm sendo postas, gradualmente, à disposição dos utilizadores dos edifícios. Porém, todas essas comodidades acarretam um aumento de investimento, consumo de energia e emissão de gases que contribuem para o aquecimento global.

O sector dos edifícios apresenta grande potencial de poupança energética e muito pode ainda ser feito a este nível, isto é, mais de 50% do consumo pode ser reduzido através de medidas de eficiência energética (DGEG, 2012). Como forma de impulsionar a melhoria do desempenho energético e das condições de conforto dos edifícios, os Estados-Membros têm vindo a promover um conjunto de medidas, tendo em conta a Directiva 2002/91/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de Dezembro de 2002 (EPBD, 2002), relativa ao desempenho energético dos edifícios. Em Portugal, a legislação tem dado especial destaque aos consumos energéticos decorrentes do aquecimento/arrefecimento dos edifícios. De modo a racionalizar estes consumos, tem-se assistido à aprovação de alguns regulamentos referentes ao comportamento térmico/energético dos edifícios, designadamente:

- Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior – Decreto-Lei n.º78/2006 (SCE, 2006);
- Regulamento dos Sistemas Energéticos e de Climatização dos Edifícios – Decreto-Lei n.º 79/2006, de 4 de Abril (RSECE, 2006);
- Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios – Decreto-Lei n.º80/2006 de 4 de Abril (RCCTE, 2006).

Como forma de racionalizar a energia consumida, os regulamentos referidos têm em conta a relação directa existente entre o consumo energético para climatização e o isolamento térmico ao nível da envolvente. Contudo, a envolvente é heterogénea em termos de características térmicas, pelo que a quantificação das perdas de calor e a aplicação do isolamento térmico não se deve remeter às zonas correntes, ou seja, importa corrigir termicamente todas as zonas particulares da construção, designadas por pontes térmicas. Para além do peso que podem ter nas trocas de calor através da envolvente dos edifícios e nos gastos energéticos, levam ao aparecimento de diversas anomalias detectadas frequentemente, cuja explicação é dada no subcapítulo 2.3.

1.2 Objectivos

Como a avaliação do impacte causado pelas pontes térmicas assenta actualmente num conjunto de situações limitado às soluções mais comuns, este trabalho tem como principal objectivo analisar os valores de cálculo utilizados para efeitos da avaliação do impacte das pontes térmicas lineares no desempenho energético dos edifícios residenciais, para um conjunto mais largo de situações, nomeadamente soluções de isolamento térmico de maior espessura.

Para além da avaliação da importância do fenómeno em termos de perdas térmicas lineares, pretende-se analisar ainda as soluções de pontes térmicas quanto ao risco de ocorrência de condensações superficiais, com recurso a um programa de análise numérica, à luz das normas internacionais, regulamentos nacionais e recomendações existentes.

O presente estudo pretende contribuir para a resolução de vários casos típicos de pontes térmicas que ocorrem na construção corrente, alertando para as implicações das várias opções possíveis. Assim, pretende-se caracterizar numericamente mais algumas soluções que fazem parte da prática construtiva portuguesa.

1.3 Plano de trabalho

A presente dissertação divide-se em 5 capítulos, de acordo com a descrição que se apresenta de seguida.

No capítulo 1, “Introdução”, faz-se uma apresentação da motivação e enquadramento do tema da dissertação, onde se explica, de uma forma sucinta, os novos desafios impostos à Europa e o papel que deve desempenhar o sector da construção na dependência energética dos edifícios. Para além disso, são explicados os objectivos e a organização do trabalho.

No capítulo 2, “Pontes térmicas: Conceito, classificação e anomalias”, é explicado o conceito de ponte térmica, faz-se a classificação que permita identificar, inequivocamente, cada situação em particular, e apresentam-se as anomalias detectadas frequentemente nestas zonas.

No capítulo 3, “Análise higrotérmica: Métodos de avaliação”, avalia-se o impacte do fenómeno das pontes térmicas em termos de transferência de calor, em elementos homogéneos e heterogéneos da envolvente, e faz-se referência aos vários métodos experimentais, numéricos e simplificados aplicáveis à análise higrotérmica do fenómeno.

No capítulo 4, “Metodologias de cálculo adoptadas pela regulamentação europeia e portuguesa”, são explicadas as metodologias de cálculo simplificado adoptadas pelo RCCTE (2006) e pela Norma Europeia EN ISO 14683 (2007), para quantificar as perdas de calor através das pontes térmicas lineares.

No capítulo 5, “Análise numérica de pontes térmicas”, explica-se o programa de simulação numérica utilizado no presente trabalho e descrevem-se as propriedades térmicas calculadas pelo mesmo. Para além disso, concretiza-se a análise higrotérmica das possíveis correcções em zona de ponte térmica propostas no presente trabalho.

Por fim, no capítulo 6, “Conclusões e sugestões para desenvolvimentos futuros”, são apresentadas as conclusões e referidos os aspectos que, na sequência deste trabalho, podem vir a ser desenvolvidos num futuro próximo.

2. PONTES TÉRMICAS: CONCEITO, CLASSIFICAÇÃO E ANOMALIAS

2.1 Conceito

Uma ponte térmica pode ser definida como toda a zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada (EN ISO 10211-1, 2007), originando um fluxo de calor multidimensional (bidimensional ou tridimensional). Assim, deixa de ser válida a teoria de que a resistência térmica é uniforme ao longo de toda a sua área e o fluxo de calor toma as direcções em que a oposição oferecida à passagem de calor é menor, isto é, deixa de ser unidireccional para passar a apresentar componentes segundo 2 ou 3 direcções (2D ou 3D).

A alteração da resistência térmica ao nível da envolvente dos edifícios pode ser provocada pela existência localizada de materiais de diferentes condutibilidades térmicas (Figura 2.1) e/ou devido a uma alteração da geometria da envolvente. Tais pontes térmicas ocorrem tipicamente na junção de diferentes componentes construtivos, onde é difícil garantir a continuidade da camada de isolamento térmico (coberturas, pavimentos, tectos, e outras paredes, ou em outros detalhes construtivos como cantos, aberturas de janelas ou portas), na presença de um gradiente térmico que se estabelece entre dois ambientes (interior e exterior).

As pontes térmicas são zonas que apresentam menor resistência térmica que os restantes elementos que compõem a envolvente do edifício, conduzindo a perdas de calor mais elevadas do que as verificadas na zona corrente da envolvente. Estas perdas térmicas provocadas pelo fenómeno têm um grande efeito sobre o desempenho térmico da envolvente do edifício, aumentando significativamente a perda de calor no Inverno e ganho de calor no Verão (Larbi, 2005).

Em zona de ponte térmica, sob condições de inverno e em regime permanente, a densidade do fluxo de calor é mais elevada que nas zonas vizinhas e a temperatura superficial interior é mais baixa. A distribuição da temperatura superficial interior é heterogénea e implica uma deformação das linhas isotérmicas, embora o fluxo de calor se propague perpendicularmente a essas linhas. Assim, verifica-se um aumento dos consumos energéticos quando se pretende garantir as condições de conforto num determinado edifício.

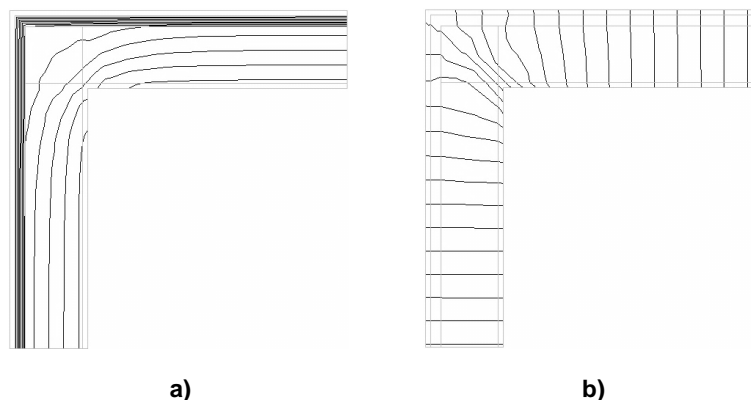


Figura 2.1 – Exemplo de ponte térmica linear entre duas paredes verticais. **a)** Linhas isotérmicas de temperatura. **b)** Linhas de fluxo de calor

Nos dias que correm, a aplicação de isolamento térmico tornou-se indispensável para fazer face às exigências impostas pela regulamentação em vigor. Nas paredes duplas a solução passa pela colocação de isolamento no interior da caixa-de-ar, enquanto nas paredes simples é colocado no interior ou exterior do paramento. As pontes térmicas surgem normalmente quando, por questões construtivas, um ou vários materiais com grande condutibilidade térmica (por exemplo, os elementos estruturais) interrompem outro(s) materiais com uma maior capacidade de isolamento (por exemplo, isolamento térmico).

Em construções convencionais verifica-se que o fenómeno ocorre, em geral, nas zonas de contacto entre a estrutura e os elementos sem isolamento contínuo. Contudo, os problemas associados às pontes térmicas agravam-se com a introdução de isolamentos ao nível da caixa-de-ar da secção da parede, não só devido à dificuldade construtiva de se garantirem isolamentos contínuos, mas também pela diminuição de estanquicidade ao ar e isolamento das caixilharias e caixas de estores.

A aplicação de isolamento térmico em zona corrente deveu-se a três questões essenciais, designadamente:

- Pela necessidade de diminuir o consumo de energia em edifícios;
- Para reduzir o risco de ocorrência de condensações e desenvolvimento de bolores e fungos;
- Para aumentar o nível de conforto térmico no interior das habitações, quer seja durante o Inverno ou Verão.

Mais à frente, faz-se uma descrição sucinta das várias anomalias provocadas pelo fenómeno das pontes térmicas (subcapítulo 2.3).

2.2 Classificação

O estudo das pontes térmicas engloba, como visto anteriormente, uma grande diversidade de soluções possíveis. Logo, é necessário adoptar uma classificação que permita identificar, de uma forma clara, cada situação em particular.

Neste estudo, é adoptada uma classificação com base na leitura combinada de alguns autores referenciados (Corvacho 1987; Larbi 2005). Assim, as pontes térmicas podem ser de dois tipos:

- As bidimensionais, que englobam a grande maioria das pontes térmicas, podem dividir-se em dois grandes grupos: as pontes térmicas planas e as pontes térmicas lineares. As pontes térmicas planas ocorrem devido a heterogeneidades inseridas na zona corrente da envolvente, isto é, locais onde se verifica uma alteração na composição estrutural do elemento construtivo (por exemplo, um pilar ou uma coluna numa parede). Todas estas zonas estão incluídas no cálculo do valor global de U do elemento;

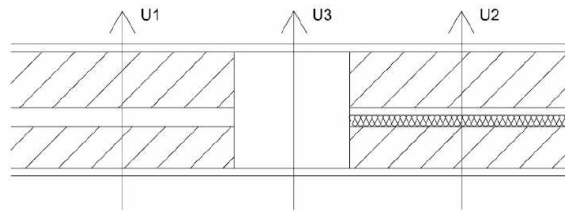


Figura 2.2 – Ponte térmica provocada por um pilar inserido na envolvente (Freitas, 2007)

As pontes térmicas lineares surgem na junção de dois elementos de planos diferentes (cunhais e cruzamentos), incluindo janelas e portas, ligação entre a fachada e a cobertura e ligação entre duas paredes verticais, em que o coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) é multiplicado pelo desenvolvimento (comprimento) da ponte térmica;

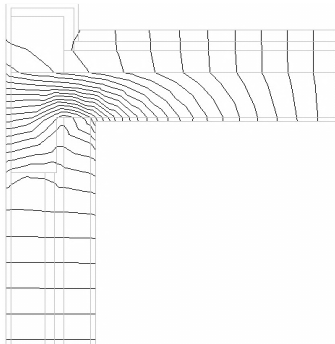


Figura 2.3 – Pontes térmicas devido à existência de materiais de diferentes condutibilidades térmicas na ligação da fachada com a cobertura

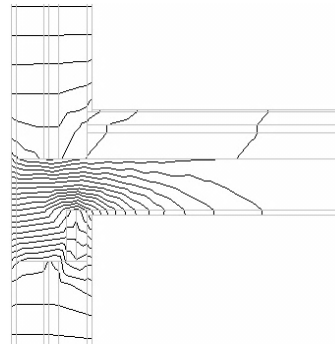


Figura 2.4 – Pontes térmicas devido à existência de materiais de diferentes condutibilidades térmicas na ligação da fachada com pavimentos intermédios

- As concentradas ou pontuais (tridimensionais), como varandas que perfuram as camadas de isolamento. Neste caso, a perda térmica pontual é multiplicada pelo número de pontes térmicas. Aquando do cálculo do desempenho energético, muitos regulamentos nacionais utilizados para a quantificação das perdas térmicas desprezam as pontes térmicas tridimensionais.

2.3 Anomalias

Como já foi referido anteriormente, em zona de ponte térmica o fluxo de calor tem características bidimensionais ou tridimensionais e a distribuição de temperaturas, ao nível das superfícies interiores, é heterogénea. Uma vez que a resistência térmica é inferior à da zona corrente, os valores destas temperaturas são, em geral, mais baixos. Contudo, em certos pontos localizados as temperaturas podem atingir valores desfavoráveis.

A existência de pontes térmicas na envolvente dos edifícios está na origem de diversas anomalias, designadamente o agravamento do risco de ocorrência condensações superficiais, o desenvolvimento de bolores e a degradação de revestimentos.

As implicações directas da existência de pontes térmicas já foram objecto de estudos anteriores e identificadas em situações bem concretas (Corvacho 1996; Abreu 2004; Correia 2011; Pechincha 2011). Assim, a abordagem a esta matéria sustenta-se essencialmente nos estudos referidos. De seguida, faz-se uma descrição detalhada das principais anomalias provocadas pelas pontes térmicas.

2.3.1 Agravamento do risco de ocorrência de condensações superficiais. Método de avaliação

A existência de pontes térmicas nos edifícios promove o aparecimento de condensações superficiais ao nível das faces interiores da envolvente. Como resultado de uma mera constatação visual, é perceptível que as condensações superficiais despontam inicialmente ao nível dos vidros, só depois se estendem às zonas de ligação entre os elementos construtivos, isto é, às zonas de pontes térmicas (ao longo das ligações entre paredes, entre as paredes e as caixilharias de janelas, entre as paredes e os pavimentos, etc.).

No interior dos edifícios, o ar, na sua constituição, contém uma determinada quantidade de vapor de água que depende da ventilação dos espaços interiores, da produção de vapor no local e da quantidade de vapor deslocada pelo ar exterior. O arrefecimento de uma massa de ar pode provocar condensações de vapor de água, sempre que se atinja o limite de saturação correspondente a uma dada temperatura (Henriques, 2007). A uma determinada quantidade de vapor de água existente no ar corresponde um valor mínimo da temperatura (temperatura do ponto de orvalho) abaixo do qual não se pode descer sem que ocorram condensações (Corvacho, 1996).

A zona de ponte térmica leva a uma diminuição da temperatura superficial interior, comparativamente à zona corrente (Abreu, 2003). Assim, a possibilidade destas temperaturas chegarem a valores inferiores à temperatura de ponto de orvalho é maior do que em zona corrente.

Para avaliar a ocorrência de condensações nos elementos construtivos heterogéneos, recorre-se a um parâmetro térmico adimensional denominado factor de temperatura superficial (f_{Rsi}). O factor de temperatura f_{Rsi} trata-se de um valor que permite avaliar, de uma forma realista, o risco de ocorrência de condensações nos elementos construtivos, com base em condições de fronteira convencionais (Wouters et al. 2003). Contudo, este parâmetro depende da escolha do valor de R_{si} (resistência superficial interior).

Com base na Norma Europeia EN ISO 10211-2 (2007), o factor de temperatura superficial pode ser expresso através da equação (2.1):

$$f_{Rsi,min}(x,y) = \frac{\theta_{si,min}(x,y) - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (2.1)$$

em que:

- $f_{Rsi}(x,y)$ é o factor de temperatura (adimensional) para a superfície superficial interior no ponto (x,y) ;
- θ_i é a condição de fronteira da temperatura interior [°C];
- θ_e é a condição de fronteira da temperatura exterior [°C];
- $\theta_{si,min}(x,y)$ é a temperatura mínima superficial interior [°C] no ponto (x,y) , abaixo da qual se pode esperar que ocorram problemas de condensações.

Como já referido, o factor de temperatura superficial permite verificar se existe a possibilidade de ocorrência de condensações superficiais. Em Portugal, a legislação não prevê um valor mínimo para o factor de temperatura superficial interior f_{Rsi} , no entanto, existem algumas recomendações que dependem do tipo de edifício ou da sua utilização (RODRIGUES et al, 2009). Como se verifica no Quadro 2.1, o valor mínimo de f_{Rsi} para edifícios residenciais é 0,65.

Quadro 2.1 - Valor mínimo do factor de temperatura superficial para precaver o fenómeno de condensação (RODRIGUES et al. 2009)

Classe de humidade	Edifício/Local	$f_{Rsi,min}$
1	Armazéns	0,30
2	Escritórios, lojas	0,50
3	Edifícios residenciais com pequena ocupação	0,65
4	Edifícios residenciais com elevada ocupação, pavilhões...	0,80
5	Locais especiais, piscinas, lavandarias	0,90

Os países europeus baseiam-se nesse valor ou em orientações para regulamentar o risco da ocorrência de condensações superficiais. O Quadro 2.2 sintetiza os valores mínimos de f_{Rsi} utilizados nos vários países e obtidos de acordo com Kalamees (2006).

Quadro 2.2 - Valor mínimo do factor de temperatura superficial para precaver o fenómeno de condensação de acordo com (Kalamees, 2006)

País	$f_{Rsi,min}$
França	0,52
Holanda	0,65
Finlândia	0,65
Bélgica	0,70
Alemanha	0,70
Suíça	0,75
Grã-Bretanha	0,75

A ocorrência de condensações interiores dá origem ao aparecimento não programado de água nos elementos construtivos, podendo resultar no desenvolvimento de diversas formas de degradação de gravidade variável. A presença de tais condições pode favorecer o desenvolvimento de bolores e a degradação dos revestimentos cuja abordagem é realizada, de seguida, mais pormenorizadamente.



Figura 2.5 – Condensações superficiais (Engenharia Civil, 2012)

2.3.2 Desenvolvimento de bolor

Como visto anteriormente, a ocorrência de condensações pode implicar o desenvolvimento de diversas formas de degradação, contudo, o desenvolvimento de bolor pode ocorrer sem a presença de condensações visíveis, pois basta estarem reunidas algumas condições que ajudem ao desenvolvimento destes microorganismos. Uma dessas condições essenciais é a presença de oxigénio em quantidade suficiente, o que está assegurado.

A presença de bolor na superfície interior da envolvente dos compartimentos é inaceitável já que altera desagradavelmente o aspecto dos locais, degrada os acabamentos interiores, expele odores indesejáveis e pode ter consequências nefastas para a saúde dos ocupantes, especialmente de tipo alérgico (Corvacho, 1996).

Por razões óbvias, o desenvolvimento de bolor é indesejável em edifícios, não só pela sua aparência desagradável, mas também por provocar um sentimento de culpa nos ocupantes devido ao seu inadequado comportamento higiénico. Tais manifestações podem provocar reacções imunitárias e alérgicas, como resultado da inalação de compostos voláteis e esporos de fungos, que se encontram em abundância neste tipo de ambiente. Se o bolor for absorvido pelo corpo humano (por exemplo, através dos alimentos bolorentos) pode provocar doenças, devido à formação de substâncias venenosas e/ou cancerígenas. A deterioração dos materiais orgânicos onde se desenvolvem (pinturas, silicões, camadas de acabamento, etc.) é outra das razões pelo qual é incómodo o desenvolvimento de bolor nos edifícios.

As muitas espécies de bolor existentes apresentam características díspares, contudo, em geral, o seu crescimento é possível quando se está perante as seguintes circunstâncias favoráveis (Wouters et al. 2003):

- Ambiente interior com uma quantidade de oxigénio suficiente e uma temperatura entre 0°C e 60°C (situação óptima entre 5°C e 25°C);
- Um substrato adequado (por exemplo, cola de celulose utilizada na aplicação do papel de parede, superfícies pintadas, silicões, madeira, gesso, etc.);
- Humidade suficiente no meio ambiente e/ou nos materiais de construção.

Vários tipos de edifícios coabitam com estas condições durante curtos ou longos períodos, pelo que não é de estranhar que o desenvolvimento de bolor suceda com alguma frequência. Porém, a

última situação referida (humidade) é o factor mais importante, pois a água é essencial ao aparecimento de bolores. A sua formação principia muitas vezes em zona de cunhal devido à dificuldade de secagem, que advém da baixa circulação de ar nesse local.

A ausência de luz solar incidente conduz também a um desenvolvimento mais acentuado dos bolores, o que acontece nas zonas de pontes térmicas dentro dos compartimentos (Abreu, 2003). As razões que podem estar na origem do seu aparecimento são, especificamente, as seguintes:

- Todos os compartimentos possuem mobiliário;
- Apesar das aberturas para o exterior permitirem a entrada da radiação solar, também limitam a passagem de raios solares;
- A abertura ou fecho dos dispositivos de oclusão (por exemplo, persianas e estores);
- A geometria e fachada dos compartimentos não estão orientadas de modo favorável à entrada da radiação solar.



Figura 2.6 – Desenvolvimento de bolores em zona de ponte térmica

2.3.3 Degradação dos revestimentos

A existência de humidade de condensação e a presença de bolores conduzem a situações de degradação das pinturas e revestimentos, com efeitos inestéticos desagradáveis e possíveis problemas de saúde (Abreu, 2003).

Quando a água entra em contacto com os materiais de revestimento altera as suas propriedades físicas, principalmente a sua condutibilidade térmica. Determinados revestimentos e pinturas, quando sujeitos à acção da humidade, perdem rigidez, surgem manchas inestéticas e o seu brilho altera-se. A perda de rigidez leva ao apodrecimento de alguns dos revestimentos empregues nos edifícios, nomeadamente de madeira, cortiça ou similares. Nos revestimentos cerâmicos podem surgir eflorescências.

O desenvolvimento de bolores na superfície interior das envolventes é danoso, pelas razões já referidas, e acarreta muitas vezes a degradação do revestimento da superfície onde ocorre, nomeadamente o descasque da pintura (Corvacho, 1996).



Figura 2.7 – Degradação do revestimento por descasque da pintura

2.3.4 Heterogeneidade de temperaturas

Para além das implicações já referidas, podem surgir outras consequências negativas do fenómeno, designadamente devido à heterogeneidade de temperaturas superficiais interiores entre a zona de ponte térmica e a zona corrente (Abreu, 2003). As consequências dessa heterogeneidade, referidas por Corvacho (1996), podem ter consequências prejudiciais, designadamente:

- Nas zonas mais frias da superfície interior da envolvente o pó deposita-se mais intensamente, originando manchas, frequentemente designadas por “fantasmas”;
- Ao longo das superfícies ocorrem, diferenciadamente, alterações de tintas e revestimentos;
- Fissuração ao nível dos revestimentos interiores.

A Figura 2.8 ilustra a superfície interior de uma laje aligeirada onde é nítida a presença de manchas correspondentes às zonas mais frias (vigotas).



Figura 2.8 – Manchas ou “fantasmas” na superfície interior da envolvente (Abreu, 2003)

3. ANÁLISE HIGROTÉRMICA: MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

3.1 Análise do fenómeno em termos de transferência de calor

A troca de energia entre corpos, devido a diferenças de temperatura, designa-se por transferência de calor. Para se estudar ou prever o comportamento dos edifícios face às acções a que estão sujeitos, é essencial conhecer os modos de propagação de calor através dos seus elementos de construção. Estes assentam nas leis e princípios básicos da termodinâmica que permitem sustentar que a transmissão de calor entre dois elementos, ou dois pontos de um mesmo elemento, ocorre sempre que entre eles exista uma diferença de temperatura levando a uma transferência de energia de um para o outro. Para além disso, esta transmissão de calor faz-se sempre no sentido do elemento com temperatura mais elevada para o de temperatura mais baixa, garantindo-se a conservação da energia, isto é, a quantidade de calor que o elemento de temperatura mais elevada cede é quantitativamente igual à do elemento mais “frio”.

Admitem-se três processos distintos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação. Os mecanismos físicos de condução e radiação dependem somente de uma variação de temperatura, no entanto, o fenómeno de convecção implica também um movimento de massa. Um fenómeno complexo de transmissão de calor inclui, os três tipos de transferência de calor, mas é muitas vezes passível de simplificação, considerando-se apenas os mecanismos de maior importância. Ao nível das envolventes opacas dos edifícios o processo físico de transmissão de calor mais importante é a condução. Como tal, de seguida, faz-se uma descrição sucinta do processo de transferência de calor por condução em elementos construtivos homogéneos e heterogéneos (zonas de pontes térmicas).

3.1.1 Transferência de calor em elementos construtivos homogéneos

A análise da transferência de calor em edifícios pode ser concretizada por subdivisão da estrutura em diferentes tipos (paredes, janelas, portas, pavimentos e coberturas), em que o cálculo das perdas de calor é realizado de uma forma isolada. Assim, o cálculo baseia-se num modelo unidimensional, isto é, assume-se que o fluxo de calor atravessa perpendicularmente as paredes homogéneas constituídas por camadas de materiais distintos (reboco, alvenaria de tijolo, isolamento térmico, etc.) e dispostos de forma paralela.

Perante tais condições, a transferência de calor de um elemento da envolvente pode ser descrita, de uma forma simplificada, pelo coeficiente de transmissão térmica (U). O valor deste parâmetro permite definir a quantidade de calor por unidade de tempo que atravessa uma superfície de área unitária desse elemento da envolvente por unidade de diferença de temperatura entre os ambientes que separa (RCCTE, 2006). O coeficiente de transmissão térmica de elementos constituídos por um ou vários materiais, com camadas de espessura constante, calcula-se através da seguinte expressão:

$$U_i = \frac{1}{R_{se} + \sum_i R_i + R_{si}} \quad [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad (3.1)$$

em que:

- R_{se} e R_{si} são as resistências térmicas superficiais exterior e interior, respectivamente [$m^2 \cdot ^\circ C/W$];
- R_i é a resistência térmica da camada i [$m^2 \cdot ^\circ C/W$].

Para camadas de materiais homogéneos, a resistência térmica R é calculada como sendo o quociente entre a espessura da camada (e) e o valor de cálculo da condutibilidade térmica do material que o constitui (λ). A expressão que se segue permite quantificar a resistência térmica dos materiais em causa:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad [m^2 \cdot ^\circ C/W] \quad (3.2)$$

Quanto às camadas de materiais não homogéneos (espaços de ar, alvenarias, etc.), o valor de R pode ser calculado de acordo com a metodologia adoptada na Norma Europeia EN ISO 6946 (2003), ou através dos valores tabelados, por exemplo, no ITE 50 (Santos e Matias, 2007).

3.1.2 Transferência de calor em elementos construtivos heterogéneos

A presença de uma ponte térmica na envolvente dos edifícios implica, como já referido aquando da explicação do conceito, que o fluxo de calor deixa de ser unidireccional para passar a apresentar componentes segundo 2 ou 3 direcções.

Um gradiente de temperatura entre a superfície interior e a superfície exterior do elemento construtivo gera um fluxo de calor por condução bidimensional ou tridimensional (Corvacho, 1996). O fenómeno descrito rege-se pela seguinte equação diferencial:

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \quad (3.3)$$

em que:

- ρ é a massa específica do material [kg/m^3];
- c é o calor específico do material [$J/kg \cdot ^\circ C$];
- λ é a condutibilidade térmica do material [$W/m \cdot ^\circ C$];
- t é o tempo [s];
- θ é a temperatura [$^\circ C$];
- x , y e z são as coordenadas espaciais num sistema de eixos ortogonais [m].

A equação diferencial (3.3) admite uma variação da condutibilidade térmica com a temperatura e com as coordenadas espaciais, pressupondo a inexistência de fontes de calor interiores aos elementos construtivos. Contudo, a resolução analítica desta equação diferencial é complexa e até mesmo inviável na prática, já que se trata de uma equação com derivadas parciais em ordem a

quatro variáveis. Porém, existem outros métodos para determinar o fluxo de calor e a distribuição de temperaturas numa determinada ponte térmica, que são abordados mais à frente.

Perante as condições referidas, deixa de ser válida a definição do coeficiente de transmissão térmica (U) enunciada no subcapítulo anterior, isto é, as várias componentes do fluxo de calor resultam em perdas suplementares que não podem ser traduzidas pelo cálculo unidimensional do parâmetro U .

O método de cálculo utilizado para determinar o fluxo de calor suplementar que atravessa os elementos heterogéneos dos edifícios depende, em primeiro lugar, da forma como é definida a transferência de calor unidimensional. Isso pode ser feito com base em convenções e simplificações adoptadas para as dimensões das superfícies, que correspondem a diferentes valores de U (Wouters et al. 2003), e que diferem, em geral, de país para país.

De uma maneira geral, a transferência de calor pode ser calculada com base nas dimensões exteriores ou interiores dos vários elementos dos edifícios, através da seguinte expressão:

$$Q_T = \sum_i U_i \cdot A_i \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [W] \quad (3.4)$$

em que:

- U_i é o coeficiente de condutibilidade térmica do elemento i [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];
- A_i é a área do elemento i [m^2];
- θ_i e θ_e são as temperaturas do ambiente interior e exterior, respectivamente [$^\circ C$]

A título de exemplo, apresenta-se a ligação de uma janela e uma parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (Figura 3.1), em que o fluxo de calor pode ser calculado com base nas dimensões exteriores, através da seguinte expressão:

$$Q_1 = (U_m \cdot A_m + U_f \cdot A_f) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [W] \quad (3.5)$$

em que:

- U_m e U_f são os coeficientes de transmissão térmica da caixa-de-ar m e da janela f , respectivamente [$W/m^2 \cdot ^\circ C$];
- A_m e A_f são as áreas de superfície da caixa-de-ar m (dimensão exterior) e da janela f (dimensão exterior vista de fora), respectivamente [m^2];
- θ_i e θ_e são as temperaturas do ambiente interior e exterior, respectivamente [$^\circ C$].

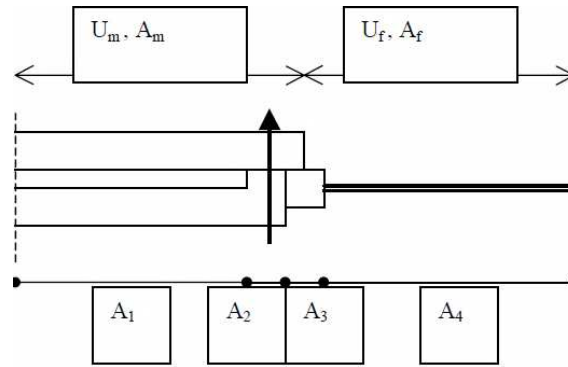


Figura 3.1 – Transferência de calor através de elementos heterogêneos dos edifícios (Wouters et al. 2003)

No entanto, o fluxo de calor pode ser estimado com base nas dimensões interiores, recorrendo a áreas interiores projectadas e aos coeficientes de transmissão térmica que lhes estão associados:

$$Q_2 = (U_1 \cdot A_1 + \dots + U_4 \cdot A_4) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [\text{W}] \quad (3.6)$$

em que:

- U_1, \dots, U_4 são os coeficientes de transmissão térmica dos materiais 1...4 [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$];
- A_1, \dots, A_4 são as áreas interiores projectadas 1...4 [m^2];
- θ_i e θ_e são as temperaturas do ambiente interior e exterior, respectivamente [$^\circ\text{C}$].

Apesar da possível utilização de ambos os métodos para a quantificação do fluxo de calor que atravessa os vários elementos construtivos de um edifício, é notório que, tratando-se de pressupostos distintos, o seu cálculo conduzirá a diferentes resultados ($Q_1 \neq Q_2$).

Seja qual for a convenção que se venha a adoptar para o cálculo do fluxo de calor, nenhuma das hipóteses acima referidas representa a perda de calor real através da janela e da parede, isto é, na zona de ligação entre a parede e a janela gera-se uma perda de calor adicional não contemplada por nenhuma das convenções. Na Figura 3.2 verifica-se a existência de uma zona onde a concentração de linhas de fluxo é mais densa, designada por zona de ponte térmica.

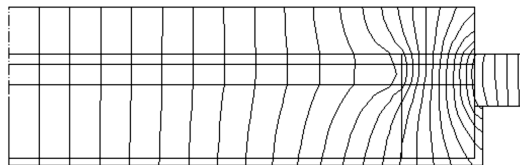


Figura 3.2 – Concentração do fluxo de calor devido ao efeito da ponte térmica (Wouters et al. 2003)

A dimensão da perda de calor adicional que atravessa a zona de ponte térmica é determinada com a introdução de um coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) e/ou de um coeficiente de

transmissão térmica pontual (χ), respectivamente, para perdas bidimensionais (lineares) e tridimensionais (pontuais). No entanto, normalmente, os cálculos desse fluxo de calor estão limitados às pontes térmicas lineares por serem as mais comuns, ao passo que as pontuais são desprezadas e só se aplicam em casos esporádicos (RCCTE, 2006).

Para se estimar com precisão o fluxo de calor em pontes térmicas é necessário recorrer a métodos numérico. O cálculo do fluxo de calor que se gera entre dois ambientes (exterior e interior) pode ser obtido através de modelos bidimensionais (2D) ou tridimensionais (3D). Contudo, no presente trabalho, a análise higrotérmica realiza-se com base no pressuposto de uma transferência de calor bidimensional. Assim, de seguida, refere-se apenas a metodologia utilizada na quantificação do fluxo de calor total, entre dois ambientes, com recurso a um modelo bidimensional.

3.1.2.1 Transferência de calor entre o ambiente exterior e interior (2D). Coeficiente de transmissão térmica linear (ψ)

O modelo bidimensional pode ser representado por planos construtivos simples de arquitectura, tais como, secções transversais que representam elementos construtivos, que se estendem uniformemente ao longo de um determinado comprimento (Wouters et al. 2003).

Para efeitos do cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear ψ , considere-se a Figura 3.3 e Figura 3.4, que representam uma ponte térmica separando dois ambientes (interior e exterior)

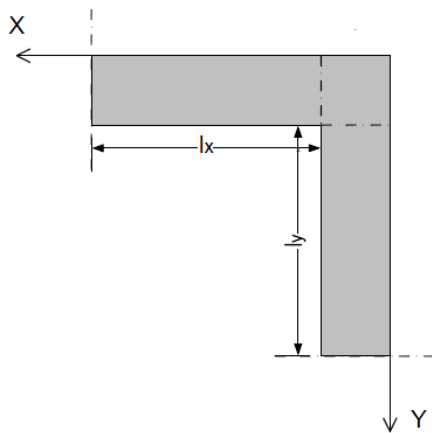


Figura 3.3 – Corte por um plano XY
(EN ISO 10211, 2007)

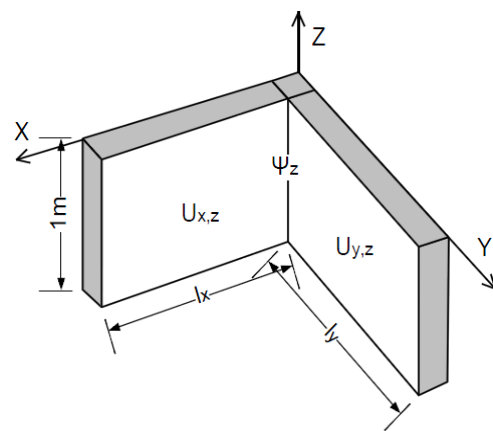


Figura 3.4 – Corte tridimensional de uma ponte térmica em zona de cunhal
(EN ISO 10211, 2007)

As perdas de calor totais, que incluem o efeito da ponte térmica, podem então ser expressas com recurso a um fluxo de calor linear (Q) obtido pela seguinte expressão:

$$Q_T = (U_{x,z} \cdot l_x + U_{y,z} \cdot l_y + \psi_z) \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [\text{W/m}] \quad (3.7)$$

Com base no disposto na Norma Europeia EN ISO 10211 (2007), o fluxo de calor bidimensional total também pode ser escrito da seguinte forma:

$$Q_T = H_T \cdot (\theta_i - \theta_e) \quad [\text{W/m}] \quad (3.8)$$

Assim, o coeficiente de transmissão térmica linear ψ_z é obtido através da seguinte expressão:

$$\psi_z = H_T - (U_{x,z} \cdot l_x + U_{y,z} \cdot l_y) \quad [\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}] \quad (3.9)$$

No caso geral:

$$\psi = H_T - \sum_i U_i \cdot l_i \quad [\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}] \quad (3.10)$$

em que:

- H_T é o coeficiente de transmissão térmica global obtido através do cálculo bidimensional da componente que separa os dois ambientes considerados $[\text{W/m} \cdot \text{K}]$;
- U_i é o coeficiente de transmissão térmica do material unidimensional i da envolvente do edifício, que separa os dois ambientes considerados $[\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$;
- l_i é o comprimento do modelo geométrico bidimensional associado ao elemento i $[\text{m}]$;
- θ_i e θ_e são as temperaturas do ambiente interior e exterior, respectivamente $[\text{K}]$.

3.2 Métodos experimentais

Para além da resolução analítica de uma dada equação diferencial existem outros métodos disponíveis para o cálculo do fluxo de calor, distribuição de temperaturas e coeficientes de transmissão térmica linear (ψ), nomeadamente os métodos experimentais, métodos numéricos e métodos simplificados.

Os métodos experimentais baseiam-se na análise prática de pontes térmicas, realizada em condições reais ou em laboratório. Contudo, como se trata de uma abordagem que envolve mão-de-obra qualificada e realizada num longo período de tempo, só é aplicável a projectos de grande importância, isto é, quando se pretende verificar a viabilidade dos valores obtidos por análise numérica. De seguida, descrevem-se os vários métodos que podem ser utilizados na análise experimental de pontes térmica.

3.2.1 Análise em condições reais

A medição de temperaturas e fluxos de calor ao nível das pontes térmicas também pode ser realizada em condições reais, isto é, quando estas se encontrem inseridas nas construções em funcionamento (Corvacho, 1996). A análise em condições reais permite estimar as temperaturas ambientais e superficiais de ambos os lados do elemento construtivo. A evolução dinâmica do clima interior e exterior, designadamente da temperatura, humidade e velocidade do vento, gera uma variação de temperaturas no elemento construtivo. Perante estas condições, só se obtêm resultados

credíveis quando as medições são realizadas num longo período de tempo, no entanto, os valores médios obtidos para os factores de temperatura devem ser alvo de uma interpretação cuidadosa.

Para se conseguir uma correcta interpretação dos valores obtidos através da análise em condições reais, deve optar-se por alguns procedimentos relacionados com o factor de temperatura superficial e os climas interior e exterior, tais como:

- **Clima interior** – realizar, durante um período mínimo de um mês, a medição contínua da temperatura e humidade interior durante a estação de aquecimento. Para além disso, deve calcular-se a média diária semanal e mensal da temperatura interior;
- **Clima exterior** – fazer, durante um período mínimo de um mês, a medição da temperatura e humidade relativa exterior. Caso não se recorra à análise em condições reais, são utilizados como dados de entrada, para a temperatura exterior e humidade relativa, os valores da estação mais próxima;
- **Factor de temperatura** – medir a temperatura superficial em alguns pontos críticos da superfície interior, durante pelo menos duas semanas. Se não for possível efectuar as referidas medições, deve recorrer-se a um programa de cálculo específico que forneça os resultados necessários à avaliação do parâmetro em causa.

Para a medição das temperaturas (superficiais e dos vários ambientes) e dos fluxos de calor recorre-se a várias técnicas de medição, nomeadamente a termopares, fluxímetros ou termografia infravermelha. Os dois primeiros equipamentos baseiam-se na transmissão de calor por condução, promovida pelo contacto com a superfície do corpo alvo de investigação. Os termopares medem a diferença de potencial eléctrico gerado pela temperatura na junção de dois metais distintos (Figura 3.5), e os fluxímetros são utilizados na medição do fluxo de calor (Figura 3.6).

Esta metodologia foi utilizada por Corvacho (1996) para a análise de duas células experimentais idênticas, embora com soluções construtivas distintas. Esta análise permitiu-lhe, não só testar experimentalmente algumas soluções, mas também definir certos aspectos tendo em vista a análise numérica.

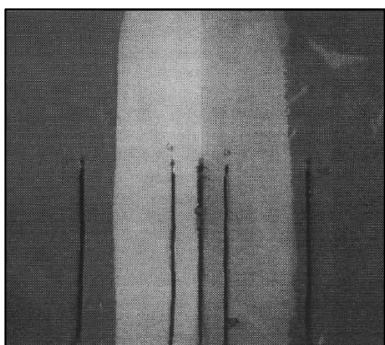


Figura 3.5 – Termopares ao nível da superfície interior da ponte térmica (Corvacho, 1996)

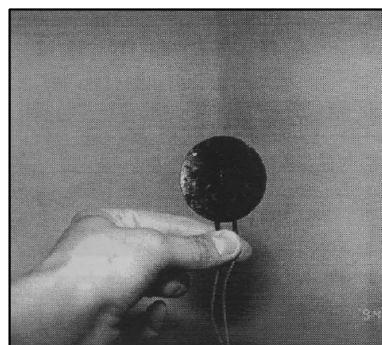


Figura 3.6 – Fluxímetro (Corvacho, 1996)

Quanto à termografia infravermelha, trata-se de um método de determinação e representação da temperatura superficial de um corpo, por medição da radiação infravermelha emitida pela sua superfície (Aelenei, 2010). Contrariamente aos fluxímetros, este tipo de equipamento de medição não

carece de contacto com a superfície do corpo que se pretende investigar, facilitando a medição de temperaturas em objectos móveis de difícil acesso ou em ambientes perigosos.

As imagens captadas pelo olho humano, à vista desarmada, resultam da radiação directa e reflectida do Sol ou de uma luz artificial. Contudo, recorrendo à tecnologia de infravermelhos, todos os objectos podem ser visualizados mesmo às escuras. Tais objectos apresentam temperaturas superiores ao zero absoluto ($-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), provocando a emissão de radiações infravermelhas.

Barreira (2004) refere três tipos de sistemas de medição utilizados actualmente na medição da radiação térmica: os termómetros pontuais de infravermelhos, os *scanners* de linha e as câmaras termográficas (Figura 3.7). Os primeiros fornecem o valor da temperatura num determinado ponto e os segundos permitem obter um perfil de temperatura ao longo de uma linha.



Figura 3.7 – Câmara termográfica “ThermaCAM™ B4”
(DeltaG, 2012)

Por fim, existem as câmaras termográficas que permitem representar imagens térmicas com a distribuição das temperaturas superficiais do objecto observado, segundo uma escala de cores ou a preto e branco (Figura 3.8).

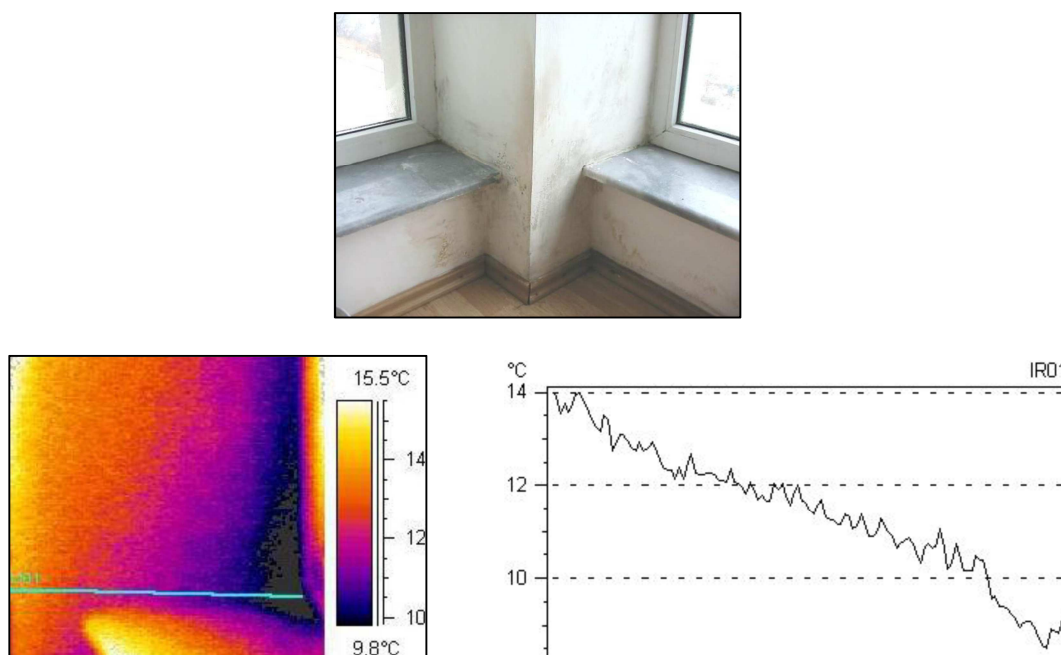


Figura 3.8 - Localização das pontes térmicas com recurso à termografia infravermelha (Aelenei, 2010)

Actualmente existem dois sistemas distintos para a formação da imagem, designadamente o sistema de varrimento e o sistema FPA (*"Focal Plane Array"*). O primeiro é constituído por um único sensor e por um sistema de varrimento óptico, em que a imagem é formada linha a linha por um conjunto de espelhos giratórios. Este sistema implica uma grande complexidade mecânica, contudo, o tempo de integração é curto. O segundo trata-se de um detector constituído por uma matriz bidimensional de sensores que captam simultaneamente todos os pontos de imagem.

Vários autores utilizaram este método para avaliar o comportamento higrotérmico dos edifícios. Barreira (2004) recorreu à termografia para analisar a sensibilidade do aparelho de termografia disponível (*Thermo Tracer TH1 101 da NEC San-ei Instruments, Ltd.*), assim como alguns exemplos de aplicação, no estudo do comportamento higrotérmico de edifícios. O estudo permitiu elaborar um catálogo de emissividades de diversos materiais, listar as principais características de alguns equipamentos existentes no mercado e obter os termogramas efectuados durante os ensaios. A autora constata que o equipamento disponível, do ponto de vista operativo, não está totalmente desactualizado, pois permite realizar um conjunto considerável de procedimentos durante a medição, nomeadamente a captação da imagem e ajuste de parâmetros de medição. Contudo, trata-se de um sistema antiquado e obsoleto no armazenamento e tratamento da informação. Para além disso, a sua utilização não é viável e fica gravemente comprometida devido ao seu peso excessivo, à necessidade de azoto líquido e impossibilidade de adaptação de uma bateria.

Pechincha (2011) também recorreu à análise termográfica para analisar alguns edifícios do Campus da FCT-UNL. Com o intuito de evitar a incidência directa da luz solar, o autor optou por realizar o estudo durante o período nocturno e em dias em que a superfície exterior não estivesse húmida, para não reduzir a temperatura superficial. Apesar de não se encontrarem vestígios de desenvolvimento de bolores, as condições higrotérmicas sob as quais decorreu a análise experimental podem não ser as mais desfavoráveis, uma vez que esta decorreu num determinado instante e não ao longo de um determinado período de tempo (dias, semanas ou meses). Logo, o autor sugere a realização de um reconhecimento inicial das capacidades do *software* complementar da câmara termográfica, de forma a recolher mais imagens num menor período de tempo, devido à localização dos edifícios em estudo (litoral de Portugal), pois existem poucos dias ideais para a realização da análise referida.

3.2.2 Análise em laboratório

Como já referido, a análise de pontes térmicas através de testes laboratoriais só se aplica em circunstâncias especiais, contudo, vale a pena fazer uma breve referência a este tipo de método experimental.

A perda energética e os coeficientes de transmissão térmica linear e pontuais referentes às pontes térmicas podem ser testados experimentalmente em laboratório, com recurso a métodos de ensaio normalizados em dois elementos construtivos idênticos, um com e outro sem ponte térmica. Contudo, estes métodos só podem ser aplicados a elementos construtivos capazes de serem testados sob estas circunstâncias.

Estes métodos são utilizados para determinar o coeficiente de transmissão térmica pontual dos elementos construtivos, para os quais é fácil realizar ambos os testes (por exemplo, perfurações metálicas em paredes isoladas).

A avaliação do factor de temperatura superficial interior f_{Rsi} em laboratório é realizada, em regime estacionário, através da medição das temperaturas ambientais e superficiais em ambos os lados do elemento construtivo que se pretende ensaiar. No entanto, o seu grau de precisão é incerto pois não são conhecidos os valores precisos das condutâncias térmicas interior (h_i) e exterior (h_e), parâmetros que influenciam directamente o resultado final.

Devido às enormes potencialidades dos programas computacionais, como já referido, a maioria dos estudos sobre pontes térmicas, de que se tem conhecimento, passa pela análise numérica de diversos pormenores construtivos. Assim, de seguida, faz-se uma abordagem aos diversos métodos numéricos e simplificados aplicáveis à análise das pontes térmicas.

3.3 Métodos numéricos e simplificados. Determinação do coeficiente de transmissão térmica linear ψ

Os métodos de cálculo numérico e manual, catálogos de pontes térmicas e/ou valores convencionais de projecto, permitem determinar o coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) e, por vezes, outras propriedades térmicas ao nível da zona de ponte térmica, como por exemplo o fluxo de calor e a distribuição de temperaturas.

Ao longo dos últimos anos, tem-se assistido a um extraordinário progresso relativo às potencialidades dos programas de cálculo automático. Os métodos de cálculo numérico utilizados nos programas computacionais baseiam-se em normas europeias, especialmente na EN ISO 10211 (2007), permitindo testar qualitativamente o programa. Os resultados obtidos por simulação numérica são comparados com os valores equivalentes referentes a casos típicos de pontes térmicas, tendo de respeitar algumas tolerâncias estipuladas pela norma. Contudo, quando se selecciona um determinado método, deve reflectir-se nele a precisão necessária ao cálculo da perda de calor total, tendo em conta o desenvolvimento das pontes térmicas lineares. Qualquer um dos métodos permite determinar o valor de ψ , contudo, deve estar presente a incerteza inerente a cada um deles (Quadro 3.1).

Quadro 3.1 – Métodos disponíveis para calcular o coeficiente de transmissão térmica linear ψ (Wouters et al. 2003)

Métodos	Incerteza esperada (%) de ψ
Cálculo numérico	$\pm 5\%$
Catálogo de pontes térmicas	$\pm 20\%$
Cálculo manual	$\pm 20\%$
Valores de projecto	0% a + 50%

Numa primeira fase, quando só se conhecem as áreas dos diferentes elementos que constituem o edifício, designadamente telhados, paredes e pavimentos, mas os pormenores

construtivos não estão concebidos, só é possível estimar, de uma forma aproximada, a contribuição que as pontes térmicas têm na perda de calor global. Para isso, recorre-se aos valores de projecto dos coeficientes de transmissão térmica que constam na Norma Europeia EN ISO 14683 (2007), ou no RCCTE (2006), no caso da norma portuguesa.

Numa fase posterior, quando já se conhece mais pormenorizadamente os detalhes construtivos, podem ser obtidos valores de ψ para cada uma das pontes térmicas previstas em projecto, comparando cada pormenor em particular com o melhor exemplo presente num catálogo de pontes térmicas e utilizando o seu valor de ψ (Subcapítulo 3.3.3). Nesta fase, também se pode recorrer a métodos de cálculo manual (Subcapítulo 3.3.4).

De uma maneira geral, quando se conhecem todos os pormenores construtivos, pode aplicar-se qualquer um dos métodos acima referidos para determinar o valor de ψ , incluindo os cálculos numéricos que proporcionam um valor mais preciso desse parâmetro térmico. Contudo, os projectistas necessitam de estabelecer limites para verificar se o desempenho previsto se adequa ao pretendido ou se é necessário melhorar o nível de detalhe. Com esse objectivo, Janssens, et al. (2007) propuseram limites para os coeficientes de transmissão térmica linear para minimizar as perdas de calor através das pontes térmicas lineares.

Lombardi (1990) citado por Corvacho (1996) sintetiza os diversos estudos realizados sobre pontes térmicas, entre 1961 e 1988, em função da sua tipologia, do método utilizado, dos resultados obtidos e da sua apresentação. Estes foram os primeiros estudos realizados sobre pontes térmicas, em que os vários investigadores elaboraram catálogos de pontes térmicas e métodos de cálculo simplificado. Mais tarde, Corvacho (1996), para além de reproduzir o quadro de Lombardi (1990), aborda mais alguns trabalhos, do seu conhecimento, realizados durante esse período e até à data da sua investigação.

Nos últimos anos, vários autores têm estudado o fenómeno elaborando métodos simplificados e catálogos de pontes térmicas. De seguida, para além da descrição de cada um dos métodos referidos, faz-se uma abordagem aos vários trabalhos realizados durante os últimos anos.

3.3.1 Métodos de cálculo numérico

A análise da transferência de calor por condução bidimensional ou tridimensional é realizada, normalmente, através de métodos de cálculo numérico que recorrem a programas de cálculo automático. Os métodos de cálculo numérico são normalmente processos iterativos, como tal, recorre-se a esses programas por serem apropriados à sua resolução. Por não apresentarem uma solução exacta necessitam de ser resolvidos numericamente.

Standaert (1985) classifica os vários métodos numéricos em MDF (método de diferenças finitas), MEF (método dos elementos finitos) e MVC (método do volume de controlo) ou técnica do balanço energético. O MDF permite resolver equações diferenciais e baseia-se na aproximação de derivadas por diferenças finitas. O MEF trata-se de uma análise matemática que consiste na discretização de um meio contínuo em pequenos elementos (mantém as mesmas propriedades do meio original), descritos por equações diferenciais e resolvidos através de modelos matemáticos.

Tanto o MDF como o MEF resolvem numericamente as equações diferenciais que regem o fenómeno das pontes térmicas. As equações são convertidas, para cada nó ou elemento, em equações algébricas com um número limitado de incógnitas. Esta discretização dá origem a um sistema de equações cuja solução fornece valores para uma das variáveis que se pretende determinar (por exemplo, temperatura). Aplicando as leis físicas pode determinar-se o valor da outra variável, designadamente o fluxo de calor.

Quanto ao MVC, contrariamente ao que sucede para os métodos anteriores, não começa por resolver as equações diferenciais, usa sim as mesmas leis físicas necessárias à sua concepção e aplica-as a subdivisões finitas do objecto, o que leva à formulação de um sistema de equações em ordem à temperatura. Os procedimentos consequentes são análogos aos adoptados para o MDF e o MEF.

Os métodos numéricos aplicáveis ao estudo das pontes térmicas permitem elaborar vários programas de cálculo automático a partir deles, tendo dado origem à criação da Norma Europeia EN ISO 10211 (2007), que para além de definir regras práticas para o uso desses métodos, estabelece ainda as condições de validação dos programas de cálculo que os utilizam.

Para além do que já foi referido sobre os cálculos numéricos, importa referir que estes devem disponibilizar a informação de qual dos três sistemas dimensionais é utilizado, isto é, se os cálculos se baseiam nas dimensões interiores (medidas entre as faces internas de cada comprimento do edifício, sem paredes divisórias), globais interiores (igual ao sistema anterior mas contempla a espessura das paredes divisórias) ou exteriores (medidas entre as faces externas dos elementos do edifício).

Vários autores recorreram aos métodos de cálculo numérico para analisar o fenómeno das pontes térmicas. Em Portugal, os primeiros trabalhos surgiram por Corvacho (1987), que propôs um programa de cálculo automático denominado “*CONDUC*”. A autora analisou os resultados obtidos através do programa de cálculo automático e comparou-os com os valores obtidos por aplicação da Norma Europeia EN ISO 6946 (2003), das fórmulas propostas pelas “*Règles Th. K-77*” e do programa de cálculo automático “*KOBRU82*”. Numa fase posterior, procedeu à validação do programa “*CONDUC*” e concluiu que este se adequa ao estudo das pontes térmicas.

Mais tarde, a autora prosseguiu o seu estudo, tendo recorrido ao mesmo programa para analisar numericamente várias soluções construtivas. Por não ser possível testar experimentalmente todas as soluções, de uma forma completa e organizada, a autora recorre à análise numérica para mostrar que se trata de um instrumento importante, eficaz e que permite completar a informação recolhida da prática construtiva e caracterizar o comportamento térmico das várias opções possíveis (Corvacho, 1996).

Larbi (2005) também recorreu a um programa de cálculo automático de análise numérica para calcular os fluxos de calor globais que atravessam as pontes térmicas e as paredes adjacentes, em estado estacionário. O autor recorre ao programa BISCO (2006) para testar três exemplos de ponte térmica bidimensional (2D) e calcular os valores do coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) associados. De seguida, ajusta esses mesmos resultados numéricos em modelos de regressão não-

linear, e conclui que estes podem ser utilizados pelos projectistas desde que se garantam as mesmas condições de fronteira e os materiais possuam características similares às consideradas.

Valério (2007) também recorre ao mesmo programa de cálculo para determinar o valor de ψ , o que permite avaliar a importância das pontes térmicas para a performance térmica de edifícios correntes e a sua contribuição para os gastos energéticos. O autor para além de alertar para a importância das pontes térmicas, demonstra ainda que as perdas de calor através das pontes térmicas podem atingir os 20% das perdas térmicas globais.

Correia (2011) também recorre ao programa de cálculo automático BISCO (2006) para avaliar o impacto das pontes térmicas no conforto térmico dos edifícios. Com o auxílio do programa referido, avalia alguns pormenores construtivos e conclui que os valores tabelados de ψ são discrepantes dos obtidos por análise numérica. Logo, é conveniente proceder à actualização dos valores tabelados para o coeficiente de transmissão térmica.

Pessoa (2011) também recorre ao mesmo programa de cálculo para realizar a análise numérica comparativa de várias pontes térmicas identificadas em obra. Para o autor, as perdas de calor através das pontes térmicas podem representar cerca de 30% das necessidades energéticas de aquecimento. A análise efectuada permite ainda constatar, que a aplicação de certas regras construtivas em zona de ponte térmica provoca um decréscimo nas perdas térmicas lineares e uma diminuição no risco de ocorrência de condensações superficiais interiores.

No presente trabalho, à semelhança dos autores referidos, também se recorre ao programa BISCO (2006) para analisar higrotermicamente alguns pormenores construtivos. Mais à frente (capítulo 5), faz-se a descrição do método de cálculo utilizado.

3.3.2 Valores convencionais de projecto

Os valores de projecto são valores aproximados da perda térmica linear ao nível das pontes térmicas bidimensionais, que se encontram tabeladas nas normas nacionais dos países europeus e na Norma Europeia EN ISO 14683 (2007). Estes valores, para além de concederem indicações claras da sua aplicabilidade, também devem basear-se em cálculos que consideram o efeito das pontes térmicas. Assim, as pontes térmicas são definidas apenas pela sua configuração e pelo posicionamento do material de isolamento.

A adopção de valores de projecto para os coeficientes de transmissão térmica (ψ) permite estimar, de uma forma aproximada e incipiente, a contribuição das pontes térmicas na perda de térmica global. Contudo, estes valores só se utilizam na ausência de dados mais precisos sobre as pontes térmicas em causa, isto é, quando os pormenores construtivos ainda não constam no projecto.

O Anexo A (tabela A.2) da Norma Europeia EN ISO 14683 (2007) apresenta uma tabela com valores de ψ para diferentes pontes térmicas, associados a uma visualização gráfica e calculados com base na tabela A.1 (EN ISO 14683, 2007). Estes valores foram obtidos de acordo com a Norma Europeia EN ISO 10211 (2007) e são válidos apenas para efeitos de transferência de calor.

Para além da norma europeia referida anteriormente, a tabela IV.3 do RCCTE (2006) fornece um conjunto de valores de coeficiente de transmissão térmica (ψ), também eles associados a uma visualização gráfica. A legislação portuguesa (RCCTE) permite quantificar as perdas de calor que

ocorrem nas ligações dos vários elementos que constituem a envolvente vertical exterior, designadamente ao nível das pontes térmicas. As metodologias de cálculo adoptadas para ambas as normas são descritas mais à frente.

Castro (2010) elaborou um estudo acerca da componente energética das zonas de pontes térmicas, designadamente através da quantificação dos coeficientes de transmissão térmica linear relativos aos casos mais frequentes dos edifícios da construção portuguesa actual. O autor recorreu aos valores de ψ tabelados no RCCTE (2006) e comparou-os com os valores que constam no regulamento espanhol e francês.

Pessoa (2011) recorreu às duas normas para realizar a análise térmica comparativa entre os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo automático BISCO (2006), da tabela A.2 da Norma Europeia EN ISO 14683 (2007) e da tabela IV.3 do RCCTE (2006).

Apenas numa fase mais adiantada de projecto é possível utilizar catálogos de pontes térmicas. Para que a sua utilização seja eficaz, devem estar reunidos alguns requisitos, que se descrevem de seguida.

3.3.3 Outros catálogos de pontes térmicas

A elaboração de um catálogo de pontes térmicas tem como principal objectivo fornecer aos projectistas a informação necessária sobre o comportamento das pontes térmicas, de forma a permitir-lhes uma escolha conscienciosa das soluções a adoptar, sem que para isso seja necessário recorrer a qualquer outro método. Logo, apesar da dificuldade em cobrir todas as soluções de pontes térmicas, o catálogo deve abranger o maior número de casos possíveis.

Os pormenores construtivos presentes no catálogo de pontes térmicas não correspondem exactamente ao pormenor real considerado, uma vez que estes têm parâmetros fixos (por exemplo, materiais e dimensões), o que os torna menos flexíveis que os valores obtidos por cálculo numérico. Embora possa não contemplar exactamente a solução que o utilizador pretende ver caracterizada, trata-se de um instrumento fácil e rápido que concede informações úteis sobre diversas soluções idênticas. Contudo, para que o valor de ψ que consta no catálogo possa ser aplicado, é necessário que as dimensões e as propriedades térmicas do exemplo catalogado sejam semelhantes às do pormenor real, ou que o primeiro seja termicamente menos favorável que o segundo. Os valores de ψ que contam no catálogo de pontes térmicas obtêm-se através de cálculos numéricos, que devem respeitar o disposto na Norma Europeia EN ISO 10211 (2007).

Em França, o cálculo dos valores de ψ rege-se pelas regras “*Th-U*”, que para além de descreverem os princípios de cálculos das pontes térmicas, também fornecem valores para os coeficientes de transmissão térmica linear. O documento apresenta um catálogo extenso de valores por defeito e encontra-se dividido em duas partes. A primeira parte é dedicada ao cálculo simplificado relativo aos casos mais comuns da construção francesa, e a segunda parte apresenta um catálogo detalhado que pode ser utilizado quando o primeiro não aborda o caso pretendido.

Em Portugal, Corvacho (1996) foi a primeira a apresentar um catálogo de pontes térmicas, com o qual pretendeu cobrir o maior número de soluções possíveis. Para além de caracterizar as soluções

utilizadas em Portugal, propôs soluções alternativas com o intuito de melhorar a qualidade da construção no seu país.

Nesta fase de projecto, quando já se conhecem pormenorizadamente os diversos pormenores construtivos, como já referido, pode recorrer-se também ao cálculo manual. De seguida, faz-se uma descrição sucinta deste tipo de método.

3.3.4 Métodos de cálculo manual

Quando a opção passa pela utilização de métodos de cálculo manual recorre-se, geralmente, a calculadoras portáteis ou a *softwares* computacionais simples. A aplicação dos referidos métodos só é viável quando se conhece pormenorizadamente os detalhes construtivos, isto é, obtêm-se valores de ψ para as pontes térmicas previstas em projecto. Contudo, estes processos não podem ser encarados como métodos de grande precisão pois aplicam-se a um tipo específico de ponte térmica. Apesar de esse cálculo manual ser fiável ao longo de um certo intervalo específico de aplicação, tal não acontece se estiver fora.

Assim, de acordo com o disposto na Norma Europeia EN ISO 14683 (2007), qualquer cálculo manual deve facultar algumas informações indispensáveis, designadamente:

- Tipologia dos detalhes construtivos a que se aplicam;
- Limites dimensionais para os quais o método pode ser considerado como válido;
- Coeficientes de condutibilidade térmica dos materiais empregues;
- Valores das resistências superficiais térmicas utilizadas;
- Estimativa de precisão (por exemplo, erro máximo).

Larbi (2005) desenvolveu modelos de regressão do coeficiente de transmissão térmica linear para três tipos de pontes térmicas lineares (ψ), nomeadamente, na ligação da fachada com pavimentos térreos, com pavimentos intermédios e com cobertura inclinada ou terraço, com o intuito de fornecer ferramentas simples e práticas para avaliar as pontes térmicas lineares presentes na construção corrente. De acordo com o autor, os resultados que se obtêm apresentam erros máximos inferiores a 5%. Contudo, estes modelos só se utilizam para os pormenores construtivos analisados, isto é, aplicam-se especificamente a esses três tipos de pontes térmicas.

4. METODOLOGIAS DE CÁLCULO ADOPTADAS PELA REGULAMENTAÇÃO EUROPEIA E PORTUGUESA

4.1 Quantificação das perdas de calor através das pontes térmicas pela Norma Europeia EN ISO 14683 (2007)

A Norma Europeia EN ISO 14683 (2007) apresenta diversos métodos simplificados para o cálculo das perdas de calor ao nível das pontes térmicas lineares, que ocorrem nas ligações entre os vários elementos que constituem a envolvente dos edifícios. A presença de pontes térmicas na envolvente dos edifícios provoca, como já referido, alterações nas taxas de fluxo e nas temperaturas superficiais (interior e exterior). Essas taxas podem ser calculadas de acordo com a Norma Europeia EN ISO 10211 (2007). No entanto, quando se trata de pontes térmicas lineares, é conveniente recorrer a métodos simplificados ou a valores tabelados para se obter um valor estimado do coeficiente de transmissão térmica linear (ψ), os quais já foram abordados anteriormente.

De acordo com a Norma Europeia EN ISO 14683 (2007), o fluxo de calor total que atravessa a envolvente do edifício, que separa os ambientes interior e exterior, com temperaturas θ_i e θ_e , respectivamente, vem dado pela seguinte expressão:

$$Q_T = H_T (\theta_i - \theta_e) \quad [W] \quad (4.1)$$

em que:

- H_T é o coeficiente de transmissão térmica global [W/K];
- θ_i e θ_e são as temperaturas do ambiente interior e exterior, respectivamente [K].

O coeficiente de transmissão térmica global, H_T , é determinado através da seguinte expressão:

$$H_T = H_D + H_g + H_U \quad [W/K] \quad (4.2)$$

em que:

- H_D é o coeficiente de transmissão térmica unitário da envolvente do edifício, calculado através da equação (4.3) [W/K];
- H_g é o coeficiente de transmissão térmica unitário do solo calculado com o disposto na Norma Europeia EN ISO 13370 (2007) [W/K];
- H_U é o coeficiente de transmissão térmica unitário dos espaços não ventilados calculado de acordo com a Norma Europeia EN ISO 13790 (2008) [W/K].

Quanto ao cálculo do coeficiente de transmissão térmica unitário da envolvente do edifício, H_D , rege-se pela seguinte equação:

$$H_D = \sum_i (A_i \cdot U_i) + \sum_i (l_i \cdot \psi_i) + \sum_i \chi_i \quad [W/K] \quad (4.3)$$

em que:

- A_i é a área do elemento i da envolvente do edifício [m^2];
- U_i é o coeficiente de transmissão térmica superficial do elemento i da envolvente do edifício [$W/m^2.K$];
- l_i é o desenvolvimento da ponte térmica linear i [m];
- ψ_i é o coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear i [$W/m.K$];
- χ_i é o coeficiente de transmissão térmica pontual da ponte térmica pontual i [W/K].

A equação (4.3) inclui a contribuição das pontes térmicas lineares e pontuais. No entanto, em geral, as pontes térmicas pontuais são desprezadas, pois resultam da intersecção de pontes térmicas lineares. Caso haja um número significativo de pontes térmicas pontuais, os coeficientes de transmissão térmica devem ser calculados com base no disposto na Norma Europeia EN ISO 10211 (2007).

Os valores do coeficiente de transmissão térmica linear ψ podem ser obtidos, como já referido, com base em valores de projecto tabelados, catálogos de pontes térmica, métodos de cálculo manual ou numéricos. A presente norma apresenta uma série de valores de ψ , associados a diferentes pormenores construtivos e a parâmetros fixos (dimensões e materiais), que constam na tabela A.1 (EN ISO 14683, 2007). Estes valores podem ser consultados na tabela A.2 da mesma norma e variam em função da localização do isolamento térmico e da tipologia dos vários materiais que integram cada ponte térmica.

A Figura 4.1 mostra as localizações de situações típicas de pontes térmicas bidimensionais consideradas pela Norma Europeia EN ISO 14683 (2007). As letras maiúsculas indicam o tipo de ponte térmica e os sufixos anunciam as pontes térmicas em particular, por exemplo IWn denota uma ponte térmica na junção da envolvente exterior com uma parede interior e IWm indica outra ponte térmica do mesmo tipo.

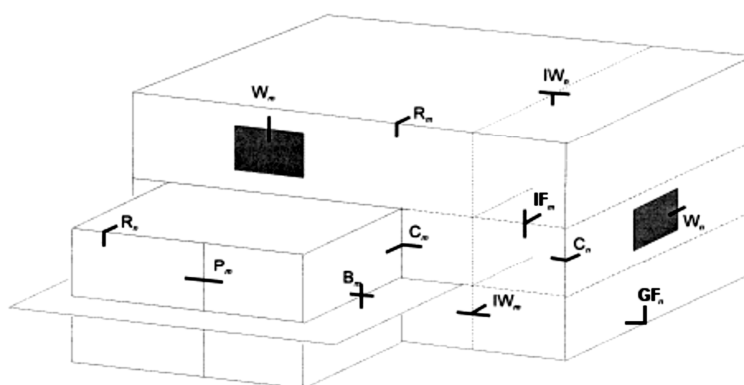


Figura 4.1 - Esquema de um edifício que apresenta o tipo e a localização de pontes térmicas, de acordo com a tabela A.2 (EN ISO 14683, 2007)

Para cada tipo de ponte térmica, a tabela A.2 (EN ISO 14683, 2007) apresenta os valores padrão de ψ (com um erro de 0,05 W/m.K), baseados nos três sistemas de dimensões:

- Ψ_i (com base nas dimensões interiores);

- Ψ_{oi} (com base nas dimensões globais interiores);
- Ψ_e (com base nas dimensões exteriores).

4.2 Quantificação das perdas de calor através das pontes térmicas pelo RCCTE (2006)

O novo Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, aprovado pelo Decreto-Lei n.º 80/2006, de 4 Abril (RCCTE, 2006), baseia-se em métodos normalizados (EN ISO 13790, 2008) para o cálculo das necessidades energéticas do edifício, permitindo uma flexibilidade e escala de comparabilidade dos resultados obtidos pelos técnicos profissionais com competências para a sua elaboração. O referido regulamento estabelece regras a observar no projecto de todos os edifícios de habitação e de serviço, sem sistemas de climatização centralizados, visando os seguintes objectivos:

- Garantir as exigências de conforto térmico de aquecimento e arrefecimento;
- Garantir as exigências de qualidade do ar interior dos edifícios por ventilação;
- Satisfazer as necessidades de água quente sanitária sem consumo excessivo de energia;
- Garantir a eficiência de sistemas e limitação de energia primária;
- Minimizar as situações patológicas nos elementos de construção provocadas pela ocorrência de condensações superficiais e no interior dos elementos da envolvente.

De seguida são descritos, de uma forma sucinta, os parâmetros de caracterização e a metodologia de cálculo adoptada pelo RCCTE (2006).

4.2.1 Parâmetros de caracterização

A caracterização do comportamento térmico dos edifícios faz-se através da quantificação de um certo número de índices e de parâmetros. Os índices térmicos que importa quantificar são os valores das necessidades nominais anuais de energia útil para o aquecimento (N_{ic}), das necessidades nominais anuais de energia útil para arrefecimento (N_{vc}), das necessidades nominais anuais de energia para produção de águas quentes sanitárias (N_{ac}) e necessidades globais de energia primária (N_{ic}). Para que se garanta o conforto térmico e a qualidade do ar no interior dos edifícios e para o cálculo da energia necessária para a produção de água quente sanitária, os índices referidos devem ser calculados com base nas seguintes condições de referência:

- As condições ambientes de conforto de referência são as seguintes: temperatura do ar de 20°C (estação de aquecimento) e temperatura do ar de 25°C e 50% de humidade relativa (estação de arrefecimento).
- A taxa de renovação de ar de referência para que se garanta a qualidade do ar interior é de 0,6 h⁻¹;
- O consumo de referência de água quente sanitária para utilização dos edifícios de habitação é de 40l de água quente a 60°C por pessoa e por dia.

Os parâmetros complementares a quantificar sob condições específicas são os coeficientes de transmissão térmica, superficiais (U) e lineares (ψ), dos elementos da envolvente, a classe de inércia térmica do edifício ou da fracção autónoma (Frac, média ou forte), o factor solar dos vãos envidraçados (g_v) e a taxa de renovação de ar (R_{ph}).

Para que um edifício/fracção possa ser considerado regulamentar é necessário que verifique determinados requisitos. De seguida, faz-se uma abordagem, descritiva e sucinta, aos vários requisitos mínimos regulamentares e térmicos que contribuíram para a formulação do RCCTE (2006).

4.2.2 Requisitos mínimos regulamentares

O RCCTE impõe requisitos mínimos de qualidade térmica aos elementos dos edifícios/fracções autónomas, limitando o valor do coeficiente de transmissão térmica superficial (U) e factor solar dos vãos envidraçados (g_v).

O Quadro IX.1 (RCCTE, 2006) estabelece valores máximos admissíveis para os coeficientes de U , em função da zona climática de Inverno (I_1, I_2, I_3) e do tipo de elemento¹ da zona corrente da envolvente. Relativamente às zonas não correntes da envolvente, o regulamento estabelece que nenhuma zona de qualquer elemento opaco da envolvente, incluindo as zonas de pontes térmicas planas, como é o caso de pilares, vigas e caixas de estore, pode ter um valor de U , calculado de forma unidimensional na direcção normal à envolvente, superior ao dobro do dos elementos homólogos (verticais ou horizontais) em zona corrente, respeitando sempre os valores máximos tabelados no Quadro IX.1 (RCCTE, 2006).

Quanto aos requisitos relativos ao valor de g_v , o RCCTE (2006) impõe que nenhum vão envidraçado da envolvente de qualquer edifício com área total superior a 5% da área útil de pavimento do espaço que serve, desde que não orientado a norte, pode apresentar um factor solar correspondente ao vão envidraçado com os respectivos dispositivos de protecção solar a 100% activos que exceda os valores indicados no Quadro IX.2 (RCCTE, 2006).

Contudo, importa referir que estão isentos da verificação do presente regulamento as habitações unifamiliares que satisfaçam associadamente as seguintes condições:

- Área útil inferior (A_{mv}) inferior a 50m²;
- Nenhum elemento opaco da envolvente, em zona corrente, pode ter um coeficiente de transmissão térmica superior ao valor correspondente ao indicado no Quadro IX.3 (RCCTE, 2006), obedecendo também ao limite estabelecido em termos de valores locais para as zonas de pontes térmicas planas;
- As coberturas têm de ser de cor clara;
- A inércia térmica do edifício tem de ser média ou forte;
- A área dos vãos envidraçados não pode exceder 15% da área útil de pavimento do edifício;

¹ As exigências não se aplicam a paredes ou a pavimentos em contacto com o terreno. De modo idêntico, também não se aplicam a elementos que separam espaços não-úteis do ambiente exterior.

- Os vãos envidraçados com mais de 5% da área útil do espaço que servem, e não orientados no quadrante Norte, devem ter factores solares que não excedam os valores indicados no quadro IX.4.

4.2.3 Requisitos energéticos

Os valores de N_{ic} , N_{vc} e N_{ac} calculados para cada fracção autónoma sujeita a verificação regulamentar nunca poderão ser superiores aos correspondentes valores limites de referência N_v (referente às necessidades nominais de energia útil de arrefecimento), N_i (referente às necessidades nominais de energia útil de aquecimento) e N_a (referente às necessidades de energia para produção de águas quentes sanitárias) impostos pela regulamentação (RCCTE, 2006). Para além destas condições e para que o edifício possa ser considerado regulamentar, as necessidades nominais anuais globais (N_{tc}) de cada uma das fracções autónomas de um edifício não podem exceder um valor máximo admissível de energia primária (N_t), definido em termos de uma soma ponderada dos valores limite N_i , N_v e N_a . A Figura 4.2 apresenta o princípio de verificação do RCCTE (2006) enunciado anteriormente.

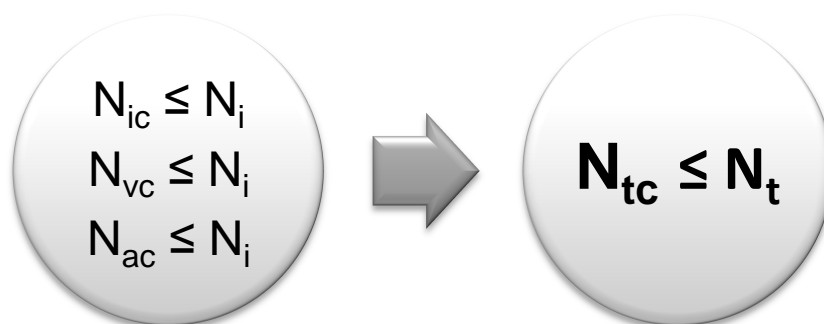


Figura 4.2 – Verificação do RCCTE (2006)

Uma vez que a análise do impacto das pontes térmicas no desempenho energético dos edifícios é realizada com o objectivo de quantificar as perdas de calor, correspondentes à situação mais desfavorável, é dado especial destaque à metodologia de cálculo simplificado do RCCTE (2006) referente às necessidades de aquecimento.

4.2.4 Metodologia de cálculo. Determinação das perdas térmicas através das pontes térmicas

As necessidades nominais de aquecimento de uma fracção autónoma de um edifício podem ser definidas como a energia útil que é necessário fornecer-lhes para manter permanentemente no seu interior a temperatura de referência, durante toda a estação convencional de aquecimento (RCCTE, 2006). Apesar de não se tratar de um método que prevê as necessidades reais de um determinado edifício/fracção, o valor das necessidades nominais é calculado para determinadas condições de referência e constitui uma forma objectiva de comparar termicamente os edifícios.

De acordo com o disposto no RCCTE (2006), as necessidades anuais de aquecimento de um edifício (N_{ic}) resultam do valor integrado da soma algébrica das perdas de calor por condução através da envolvente dos edifícios (Q_T), das perdas de calor resultantes da renovação de ar (Q_v) e dos ganhos de calor úteis (Q_{gu}) resultantes da iluminação, dos equipamentos, dos ocupantes e dos ganhos solares através dos envidraçados, por área útil de pavimento (A_p):

$$N_{ic} = \frac{Q_T + Q_v + Q_{gu}}{A_p} \quad [\text{kWh/m}^2 \cdot \text{ano}] \quad (4.4)$$

Para o âmbito do presente trabalho, interessa estudar apenas as perdas de calor por condução através da envolvente, pois a quantificação das perdas energéticas pelas pontes térmicas lineares inclui-se nessa parcela.

O RCCTE (2006) estabelece que as perdas de calor por condução através da envolvente dos edifícios, durante toda a estação de aquecimento, nomeadamente pelas paredes, pelos envidraçados, pela cobertura e pelo pavimento, fomentadas pela diferença de temperatura entre o interior e o exterior dos mesmos, resultam da soma de quatro parcelas traduzidas na seguinte equação:

$$Q_T = Q_{ext} + Q_{lna} + Q_{pe} + Q_{pt} \quad [W] \quad (4.5)$$

em que:

- Q_{ext} são as perdas de calor através das paredes, envidraçados, coberturas e pavimentos em contacto com o exterior;
- Q_{lna} são as perdas de calor pelas zonas correntes das paredes, envidraçados e pavimentos em contacto com locais não aquecidos;
- Q_{pe} são as perdas de calor através dos pavimentos e paredes em contacto com o solo;
- Q_{pt} são as perdas de calor pelas pontes térmicas lineares existentes no edifício.

Como se constata, na equação (4.5) as perdas de calor que ocorrem através das pontes térmicas incluem-se no somatório das perdas por condução. Contudo, contrariamente à Norma Europeia EN ISO 14683 (2007), o RCCTE (2006) não tem em conta as perdas de calor geradas pelas pontes térmicas pontuais. Neste caso, o coeficiente de transmissão térmica unitário da envolvente do edifício é obtido através da seguinte expressão:

$$H_D = \sum_i (A_i \cdot U_i) + \sum_i (A_i \cdot U_i \cdot \tau) + \sum_i (l_i \cdot \psi_i) \quad [W/K] \quad (4.6)$$

em que:

- A_i é a área do elemento i da envolvente do edifício [m^2];
- U_i é o coeficiente de transmissão térmica superficial do elemento i da envolvente do edifício [$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$];

- l_i é o desenvolvimento da ponte térmica linear i [m];
- ψ_i é o coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear i [W/m.K];
- τ é o coeficiente de redução das perdas térmicas associadas aos locais não aquecidos.

As perdas térmicas lineares podem representar mais de 50 % das perdas térmicas superficiais em soluções cujo tratamento das pontes térmicas não seja adequado (Freitas, 2007). O RCCTE (2006) teve em conta o referido, logo, apresenta valores convencionais do coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) para os quais as soluções construtivas e a posição do isolamento térmico são determinantes. Quanto ao valor de l , é obtido através dos projectos e desenhos do próprio edifício. De seguida é realizada a descrição dos vários coeficientes de transmissão térmica linear considerados pelo RCCTE (2006).

4.2.5 Coeficientes de transmissão térmica linear ψ

O RCCTE (2006) apresenta, como já referido, valores regulamentares do parâmetro ψ para as situações de pontes térmicas lineares mais correntes na construção portuguesa. Assim, considera as seguintes configurações tipo, para as quais apresenta as diversas hipóteses de isolamento térmico conhecidas (isolamento na face exterior ou interior de paredes simples e na caixa-de-ar de paredes duplas):

- Ligação da fachada com pavimento térreo;
- Ligação da fachada com pavimento sobre local não aquecido ou exterior;
- Ligação da fachada com pavimento intermédio;
- Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço;
- Ligação da fachada com varanda;
- Ligação entre duas paredes verticais;
- Ligação da fachada com caixa de estore;
- Ligação da fachada com padieira, ombreira ou peitoril.

O regulamento apresenta, como já referido, valores convencionais de ψ , compreendidos entre 0,10 e 0,85 W/m.^oC, para as várias situações de pontes térmicas lineares. Para às situações não tabeladas, o regulamento estipula o valor de 0,5 W/m.^oC ou remete para a Norma Europeia EN ISO 10211 (2007). Contudo, as pontes térmicas lineares podem não ser contabilizadas ($\psi = 0$), quando se verifique pelo menos uma das seguintes condições:

- Paredes interiores intersectando a cobertura e pavimentos, sobre o exterior ou sobre locais não aquecidos;
- Paredes interiores separando um espaço útil de um espaço não útil adjacente desde que o parâmetro adimensional τ seja inferior a 0,7, isto é:

$$\tau = \frac{\theta_i - \theta_a}{\theta_i - \theta_{atm}} \quad (4.7)$$

em que:

- θ_i é a temperatura do ambiente anterior [°C];
- θ_a é a temperatura do ar no local não-aquecido [°C];
- θ_{atm} é a temperatura atmosférica exterior [°C];

Para além da Norma Europeia EN ISO 14683 (2007) e do RCCTE (2006), os coeficientes de transmissão térmica podem calcular-se, como já referido, através de métodos de cálculo numérico que recorrem a programas de computacionais. No capítulo seguinte, descreve-se o programa utilizado no presente trabalho, que permitiu analisar o comportamento higrotérmico das várias soluções de pontes térmicas.

5. ANÁLISE NUMÉRICA DE PONTES TÉRMICAS

5.1 Breve descrição do programa de cálculo automático utilizado. Input

O *software* BISCO (2006) é um programa de análise térmica, em regime estacionário, que permite simular qualquer pormenor construtivo, constituído por diversos materiais e sujeito a diferentes condições de fronteira. O programa permite quantificar as perdas de calor e a possível ocorrência de condensações superficiais em zona de ponte térmica, calcular o coeficiente de transmissão térmica dos elementos construtivos, a transferência de calor através do solo e avaliar o desempenho térmico de janelas, portas e persianas, de acordo com o indicado nas normas europeias (EN ISO 10211-2, 2007; EN ISO 6946, 2003; EN ISO 13370, 2007; EN ISO 10077-2, 2003).

Numa fase inicial procede-se à elaboração do pormenor construtivo à escala, proporcionando-lhe assim uma geometria bem definida. O programa solicita um ficheiro de entrada com o pormenor construtivo com a extensão BMP, com cores distintas para cada tipo de material. Na Figura 5.1 pode observar-se, a título exemplificativo, a janela de entrada do programa onde consta um pormenor construtivo e as cores dos vários elementos que o compõem.

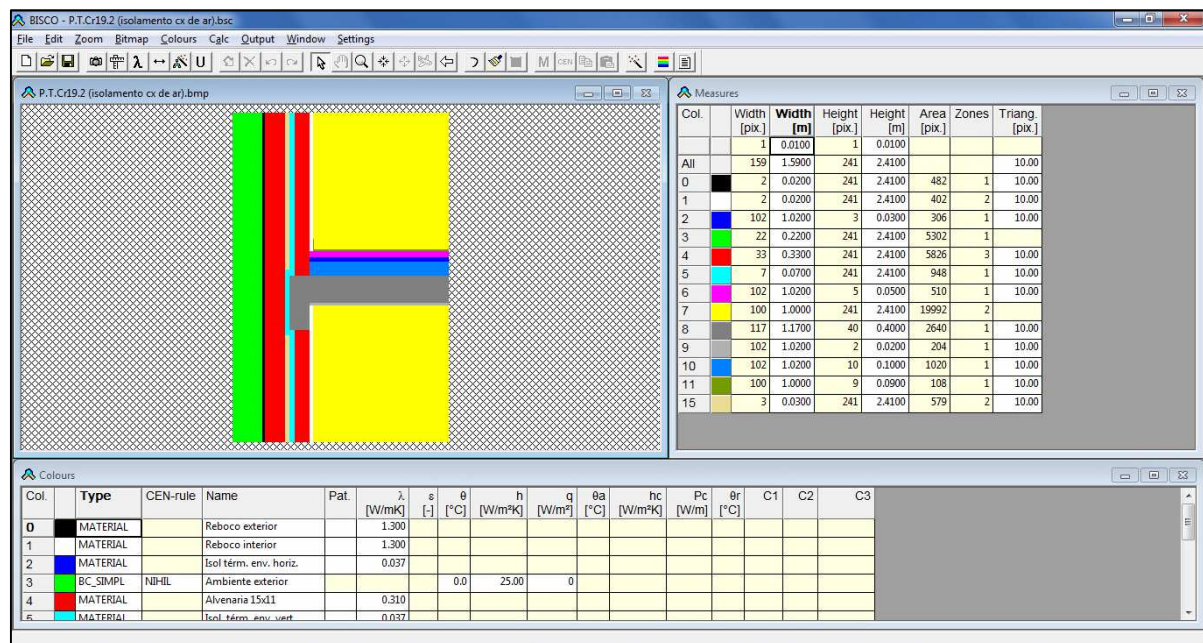


Figura 5.1 – Janela de entrada do programa com abertura do ficheiro do pormenor construtivo (BISCO, 2006)

De seguida, procede-se à introdução dos dados na janela, associando as cores às características térmicas e às condições de fronteira (condições ambientais interior e exterior). As características térmicas dos materiais são adicionadas em função do tipo de ponte térmica a analisar e do tipo de materiais adoptados. As condições de fronteira são definidas pelos coeficientes h_i e h_e , respectivamente, condutâncias térmicas superficiais interior e exterior, e pelas temperaturas do ar interior e exterior. Após o preenchimento dos vários parâmetros em todas as janelas, o programa está preparado para o cálculo do fluxo de calor que atravessa a solução construtiva.

A metodologia de cálculo adoptada e as propriedades térmicas obtidas através do programa permitem estudar os fenómenos de transferência de calor por condução que ocorrem através dos elementos construtivos, sujeitos a fluxos de calor bidimensionais, em regime estacionário.

5.2 Propriedades térmicas calculadas pelo programa. Output

O *Output* do programa é constituído por dois tipos de ficheiros: um ficheiro gráfico e um ficheiro de texto. De uma forma geral, o primeiro ficheiro permite visualizar graficamente os materiais utilizados na concepção do pormenor, a distribuição de temperaturas e de fluxos de calor nos vários elementos construtivos. O segundo ficheiro permite observar os dados de entrada e os resultados calculados pelo programa.

5.2.1 Cálculo do fluxo de calor em zona de ponte térmica (Q)

A quantificação do fluxo de calor em zona de ponte térmica assume um papel importante na avaliação das perdas energéticas dos edifícios. O processo de cálculo pouco difere do método geral adoptado para um fluxo de calor convencional. Neste caso, a diferença de temperatura também ocorre entre os ambientes exteriores e interiores, no entanto, procura-se determinar um coeficiente de transmissão térmica linear que traduza, quando associado a essa diferença de temperatura, a taxa de transferência de calor que atravessa a zona de ponte térmica. Assim sendo, é essencial o cálculo do coeficiente de transmissão térmica linear ψ , cuja descrição é realizada no subcapítulo 5.2.2.

O cálculo do fluxo de calor que atravessa um dado pormenor construtivo envolve um processo de transmissão de calor bidimensional avaliado, neste caso, com recurso ao método das diferenças finitas. O programa BISCO (2006) refere-se a um método de diferenças finitas, como tal, para o cálculo do fluxo de calor, é essencial dividir o pormenor construtivo numa malha de elementos triangulares com dimensões reduzidas. Após a divisão do pormenor em elementos de 3 nós e depois de definidas as condições de fronteira, o programa procede à resolução da equação geral de difusão de calor, fornecendo o valor das temperaturas a partir das quais é possível estimar o fluxo de calor associado (Figura 5.2).

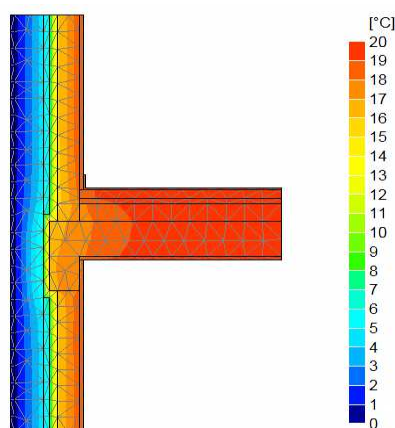


Figura 5.2 – Esquema gráfico de triangulação e distribuição de temperaturas ao nível do pormenor construtivo (BISCO, 2006)

5.2.2 Cálculo das restantes propriedades térmicas (f_{Rsi} , ψ)

O Programa BISCO (2006) permite o cálculo de várias quantidades térmicas, que se definem como importantes parâmetros de avaliação física das pontes térmicas. As propriedades térmicas determinadas pelo programa em zona de ponte térmica, nomeadamente o factor de temperatura (f_{Rsi}) e o coeficiente de transmissão térmica linear (ψ), são calculados com base na Norma Europeia EN ISO 10211-2 (2007). Para que tal seja possível, devem definir-se duas condições de fronteira com diferentes temperaturas (temperatura do ar exterior e interior) e pelo menos uma distância.

Antes da definição das propriedades térmicas, é necessário adaptar a dimensão da janela ao pormenor construtivo, tendo em conta que, de acordo com a Norma Europeia EN ISO 10211-2 (2007), as dimensões lineares baseadas nas dimensões interiores devem ser de pelo menos 1m. A necessidade de se adoptar estas novas dimensões, deve-se à insuficiente extensão da zona corrente que não permite que o fenómeno recupere a sua unidimensionalidade, ou melhor, que as linhas de fluxo de calor voltem a estar perpendiculares ao elemento. Para além disso, deve-se acautelar a necessidade de refinar a malha de cálculo, nomeadamente nas zonas mais críticas, e ter em conta a possível existência de pontes térmicas próximas da heterogeneidade a analisar. As metodologias de cálculo empregues na quantificação de ambas as propriedades térmicas, já foram enunciadas nos capítulos 2 e 3, respectivamente.

Depois de uma breve descrição do *software* de análise numérica utilizado no presente trabalho, de seguida, analisam-se possíveis correcções em zona de ponte térmica, recorrendo ao programa de computacional BISCO (2006), à Norma Europeia EN ISO 14683 (2007) e ao RCCTE (2006).

5.3 Análise de possíveis correcções em zona de ponte térmica

Neste subcapítulo, apresenta-se a análise numérica realizada a possíveis correcções em zona de ponte térmica. Para o efeito, e como já foi referido anteriormente, recorre-se a uma ferramenta de análise numérica (BISCO, 2006) para se obter o coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) e o factor de temperatura superficial (f_{Rsi}) das várias pontes térmicas em estudo.

Como a quantificação das pontes térmicas referenciadas pela regulamentação europeia (EN ISO 14683, 2007) e portuguesa (RCCTE, 2006) assenta nas situações mais comuns, procedeu-se à análise de um grupo de soluções um pouco mais alargado, que compreende várias dimensões de espessura do isolamento térmico, bem como várias configurações que visam a correcção das pontes térmicas.

Na construção de habitações unifamiliares, generalizando às soluções estruturais reticuladas de betão armado (edifícios multifamiliares), a correcção das pontes térmicas em paredes duplas, inseridas na sua envolvente exterior, é realizada através da colocação do isolamento térmico pelo interior ou exterior. De acordo com Santos (2007), a correcção térmica dos elementos estruturais feita pelo exterior requer os seguintes cuidados:

- Aderência do revestimento exterior da parede a alguns dos produtos;
- Aderência ou fixação ao suporte (alvenaria ou isolamento térmico);

- Diminuição do risco de fendilhação dos revestimentos devido a assimetrias térmicas (rigidez e estabilidade dimensional) do suporte.

Como forma de evitar os movimentos diferenciais, responsáveis pela fissuração ao nível das ligações entre as paredes e vigas/lajes, a correcção térmica deve ser realizada com um material da mesma natureza do utilizado na construção das paredes e deve garantir-se, sempre que possível, a continuidade do isolamento térmico da zona corrente para os elementos estruturais.

A correcção térmica também pode ser realizada pelo interior, embora se trate de uma solução menos eficaz, devido ao rumo do fluxo de calor em direcção aos elementos estruturais (ponte térmica linear). Contudo, este tipo de solução apresenta a vantagem de não estar exposto aos agentes atmosféricos exteriores, isto é, permite a utilização de soluções construtivas inviáveis quando se pretende realizar a correcção térmica de elementos estruturais pelo exterior. Contudo, a correcção térmica pelo interior também requer alguns cuidados, nomeadamente:

- Aderência do isolamento térmico ao suporte e dos revestimentos ao isolamento térmico;
- Compatibilização com os aspectos arquitectónicos (por exemplo, ressaltos)
- Adopção de soluções construtivas adequadas no tratamento de pontos singulares (por exemplo, na ligação a outros elementos ou zonas de transição).

Ambas as soluções referidas geram zonas de transição potencialmente problemáticas, fomentadas pela falta de continuidade do isolamento térmico da parede em zona corrente e da ponte térmica plana (Santos, 2007). Tal situação dá origem ao aparecimento do fenómeno de ponte térmica linear que, numa situação extrema, pode dar origem ao aparecimento de diversas anomalias, como já referido anteriormente (subcapítulo 2.3).

No presente trabalho, para além das situações convencionais, foram realizadas análises numéricas para as quais se procurou adaptar as soluções de parede dupla, de modo a que pelo menos um dos panos da parede materialize, em conjunto com um isolamento térmico, a correcção das pontes térmicas planas. Logo, com base nos exemplos esquemáticos apresentados por Santos (2007), foram consideradas algumas soluções de pano exterior corrigindo a ponte térmica plana estrutural e outras que atribuem ao pano de alvenaria interior a função de assegurar essa correcção.

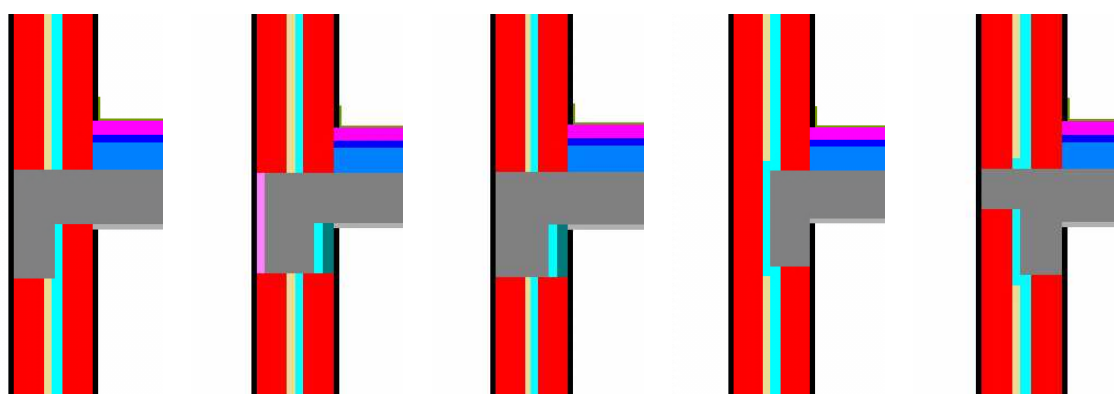


Figura 5.3 – Pormenores esquemáticos de soluções de parede dupla visando a correcção de pontes térmicas planas (Adaptado de Santos, 2007)

Para além da posição, a espessura do material de isolamento térmico é importante na análise de pontes térmicas. Com o intuito de se perceber qual a sua verdadeira importância, são apresentados graficamente os valores do coeficiente de transmissão térmica linear ψ , em função da variação da espessura de isolamento térmico, para as várias soluções consideradas.

Como não foi possível analisar todas as situações de pontes térmicas lineares existentes, o estudo debruçou-se apenas sobre os seguintes casos:

- a) Ligação da fachada com pavimentos intermédios;
- b) Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço;
- c) Ligação da fachada com varanda;
- d) Ligação entre duas paredes verticais;

Como uma ponte térmica plana constitui uma heterogeneidade que origina um acréscimo de fluxo de calor, optou-se por estimar o valor de ψ associado a esta situação, à semelhança do que é feito pela Norma Europeia EN ISO 14683 (2007), que apresenta alguns valores de ψ em função da tipologia da(s) zona(s) adjacente(s). Assim, o estudo debruçou-se ainda sobre a ponte térmica plana:

- e) Pilares inseridos em zonas correntes.

Como a análise das pontes térmicas depende dos elementos que definem a envolvente em zona corrente, de seguida, apresentam-se as propriedades térmicas associadas a cada tipo de material e as condições de fronteira.

5.3.1 Soluções de parede consideradas

Para a zona corrente de parede foram consideradas as várias hipóteses de sistemas de isolamento conhecidos, tendo-se considerado as seguintes soluções:

- i) Parede dupla com isolamento na caixa-de-ar (Figura 5.4);
- ii) Parede simples com isolamento pelo exterior (Figura 5.5);
- iii) Parede simples com isolamento pelo interior (Figura 5.6).

As várias soluções referidas foram identificadas com letras de A a I.

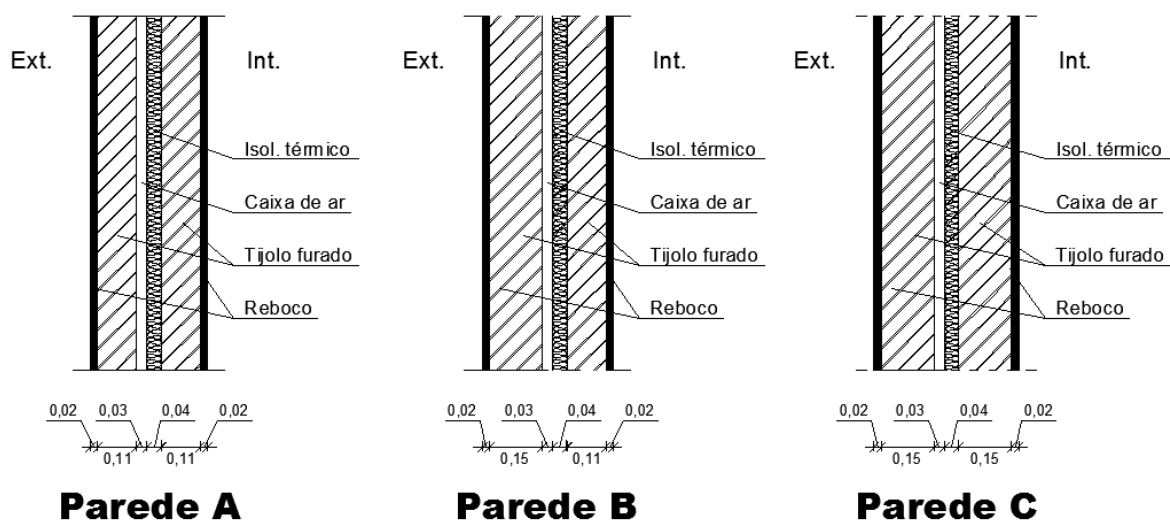


Figura 5.4 – Parede dupla com isolamento na caixa-de-ar

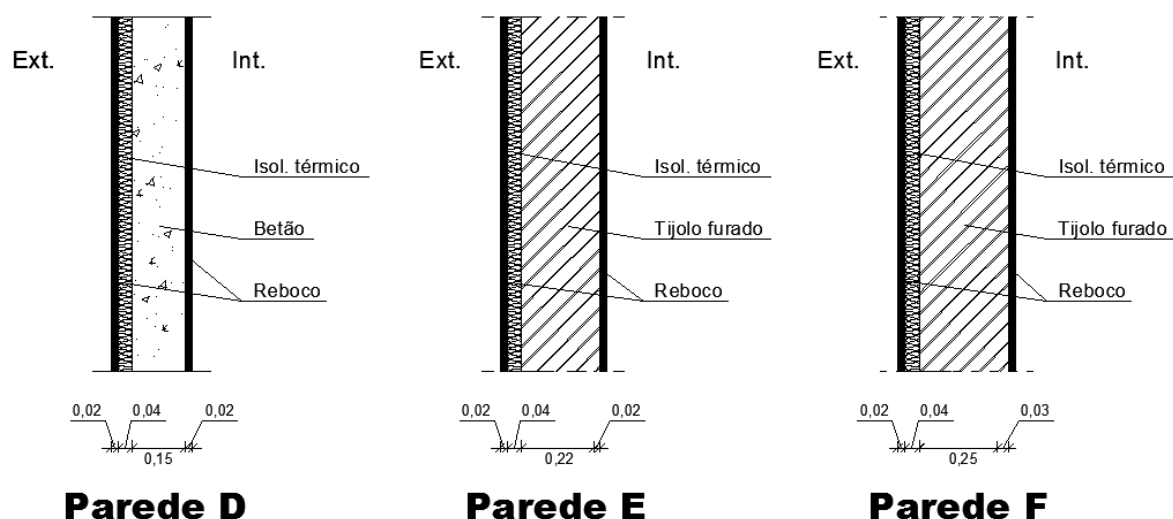


Figura 5.5 – Paredes simples com isolamento pelo exterior

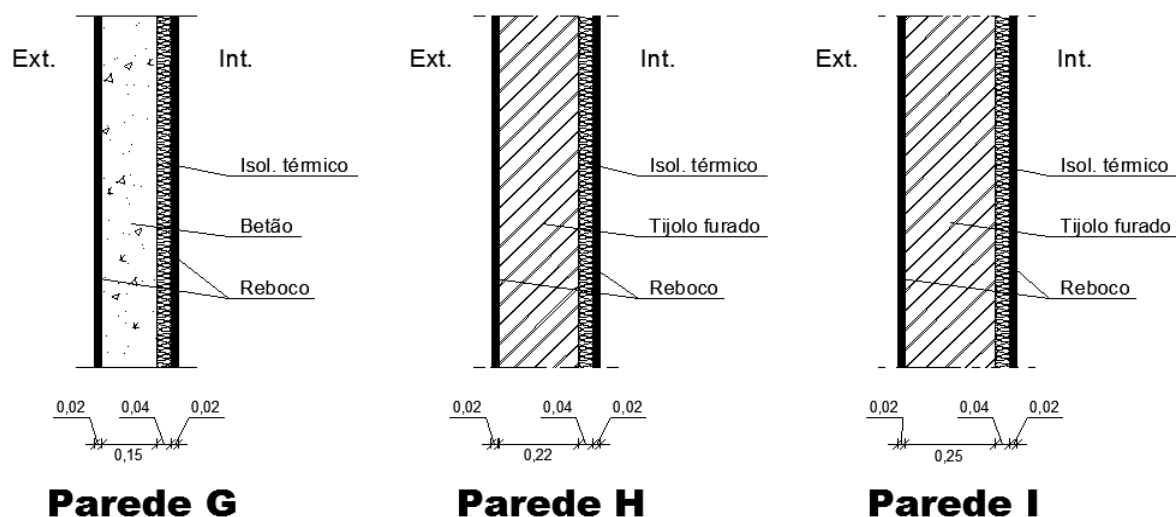


Figura 5.6 – Paredes simples com isolamento pelo interior

5.3.2 Propriedades dos materiais

A condutibilidade térmica (λ), normalmente expressa em $W/m.K$ ou $W/m.^{\circ}C$, é uma propriedade que caracteriza os materiais homogêneos, e que traduz a quantidade de calor que atravessa uma dada espessura unitária de um material, sempre que se estabelece uma diferença de temperatura unitária. Devido à necessidade de introdução do valor da condutibilidade térmica de cada material no programa de cálculo, é necessário quantificar esse mesmo parâmetro.

Para os materiais homogêneos, ou aceites como tal, foram utilizados os valores tabelados no ITE 50 (Santos e Matias, 2007) e aceites regularmente. Quanto à caixa-de-ar vertical, dado que o sentido do fluxo de calor é horizontal, a literatura da especialidade (Santos e Matias, 2007) aconselha que se considere uma resistência de $0,16 m^2.^{\circ}C/W$, pois a espessura está compreendida entre 25 e 300mm. Em termos de condução de calor, esta reflexão equivale a ter um material sólido homogêneo

com uma espessura igual à da caixa-de-ar e uma condutibilidade térmica fictícia (λ), sendo o seu valor dado pela razão da espessura (e) com a resistência térmica (R).

No seguimento do que foi referido, e com base na Norma Europeia EN ISO 10211-2 (2007), o valor da condutibilidade térmica da caixa-de-ar e do tijolo furado vem dado por:

$$\lambda = \frac{e}{R} \quad [\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}] \quad (5.1)$$

em que:

- λ é a condutibilidade térmica fictícia do material [$\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$];
- e é a espessura do material [m];
- R é a resistência térmica do material [$\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K/W}$].

Para o tijolo furado, à semelhança da caixa-de-ar, adoptou-se um material homogéneo fictício que garantisse, com a mesma espessura, a resistência térmica total do tijolo furado (Santos e Matias, 2007). Assim sendo, para o cálculo da sua condutibilidade térmica, optou-se pela expressão enunciada em cima (5.1).

Para efeitos de análise numérica das pontes térmicas, os valores considerados para a condutibilidade térmica dos diferentes materiais, reais ou equivalentes, assim como a sua referência, constam no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Condutibilidade térmica dos diferentes materiais, reais ou equivalentes, considerados na análise numérica

Material		Condutibilidade térmica ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$)	Referência
Caixa-de-ar		0,167	Quadro I.4 (ITE 50, 2007)
Reboco		1,300	Quadro I.2 (ITE 50, 2007)
Estuque		0,400	Quadro I.2 (ITE 50, 2007)
Laminado de madeira		0,180	Quadro I.2 (ITE 50, 2007)
Revestimento cerâmico		1,300	Quadro I.2 (ITE 50, 2007)
Seixo		2,000	Quadro I.2 (ITE 50, 2007)
Betão armado		2,000	Quadro I.2 (ITE 50, 2007)
Betão de enchimento – “LECA MIX”		0,156	www.weber.com.pt
Betonilha de regularização		1,300	Quadro I.2 (ITE 50, 2007)
Alvenaria de tijolo furado – espessura (m)	0,03	0,429	Quadro I.5 (ITE 50, 2007)
	0,04	0,400	Quadro I.5 (ITE 50, 2007)
	0,22	0,423	Quadro I.5 (ITE 50, 2007)
	0,25	0,446	Quadro I.5 (ITE 50, 2007)
Alvenaria de tijolo furado – espessura (m)	0,11x0,11	0,306	Quadro I.6 (ITE 50, 2007)
	0,15x0,11	0,310	Quadro I.6 (ITE 50, 2007)
	0,15x0,15	0,313	Quadro I.6 (ITE 50, 2007)
Isolamento térmico e/ou acústico	XPS/EPS	0,037	Quadro I.1 (ITE 50, 2007)
	Lã mineral	0,037	www.knaufinsulation.pt

5.3.3 Condições de fronteira

As condições de fronteira foram inseridas no programa de cálculo através das condutâncias térmicas superficiais (h_i e h_e) e das temperaturas do ar interior e exterior.

O valor da condutância térmica superficial interior, inserido no programa BISCO (2006) como dado de entrada, foi obtido com base na seguinte expressão:

$$h_i = \frac{1}{R_{si}} \quad (5.2)$$

em que:

- R_{si} é o valor da resistência térmica superficial interior [$m^2.K/W$];
- h_i é o valor da condutância térmica superficial interior [$W/m^2.K$].

De forma análoga é obtida condutância térmica superficial exterior (h_e), que se rege pela seguinte expressão:

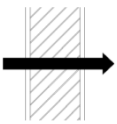

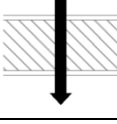
$$h_e = \frac{1}{R_{se}} \quad (5.3)$$

em que:

- R_{se} é o valor da resistência térmica superficial exterior [$m^2.K/W$];
- h_e é o valor da condutância térmica superficial exterior [$W/m^2.K$].

Quanto aos valores da resistência térmica superficial interior e exterior, respectivamente, R_{si} e R_{se} , foram adoptados os valores tabelados no ITE 50 (Santos e Matias, 2007), em conformidade com o anexo B (EN ISO 10077-2, 2003), e que constam no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Resistências e condutâncias térmicas superficiais adoptadas na análise das pontes térmicas

Sentido do fluxo de calor	Resistência térmica superficial [$m^2.K/W$]		Condutância térmica superficial [$W/(m^2.K)$]	
	Exterior (R_{se})	Interior (R_{si})	Exterior (h_e)	Interior (h_i)
Horizontal 	0,04	0,13	25,00	7,69
Vertical ascendente 	0,04	0,10	25,00	10,00
Vertical descendente 	0,04	0,17	25,00	5,88

Para concluir a definição das condições de fronteira consideradas para efeitos de cálculo, falta referir quais os valores adoptados para as temperaturas do ar:

- Temperatura exterior: 0°C;
- Temperatura interior: 20°C.

5.3.4 Análise comparativa entre os resultados obtidos pelo BISCO e os valores regulamentares de ψ que constam no RCCTE (2006) e na EN ISO 14683 (2007)

Antes da apresentação dos quadros, é necessário proceder a alguns esclarecimentos referentes às opções tomadas. Para a materialização dos quadros, e para os vários sistemas de isolamento, foram consideradas as soluções de parede enunciadas no subcapítulo 5.3.1.

No que diz respeito aos elementos horizontais que separam os espaços aquecidos, foram consideradas lajes maciças em betão armado com 0,20m de espessura, sob as quais é aplicado reboco com uma espessura de 0,02m. Sobre as lajes é aplicada uma camada de regularização com 0,10m, uma lã mineral com 0,03m, betonilha de regularização com 0,05m, e laminado de madeira com 0,01m de espessura como revestimento de piso.

Para as coberturas planas foram consideradas lajes maciças em betão armado, sob as quais é aplicado o reboco com 0,02m de espessura. Sobre a laje é aplicado o betão leve (betão de enchimento) com 0,10m, isolamento térmico com 0,04m, e como camada de protecção, seixo com 0,05m de espessura. Contudo, apesar de não constar nos vários pormenores construtivos, está previsto um sistema de impermeabilização (por exemplo, telas betuminosas) sobre a camada de betão leve.

Para as coberturas com desvão procedeu-se à dispensa de algumas das camadas referidas anteriormente, o que implica uma menor espessura. Apesar de se tratar de uma situação mais desfavorável, a laje de cobertura com desvão está sempre menos exposta que uma laje de terraço, logo, não se justifica a elaboração de quadros diferentes, pois as duas situações são equivalentes.

Os quadros que se apresentam de seguida traduzem a análise de possíveis correcções em zona de ponte térmica, em função do tipo de parede considerada, do posicionamento do material de isolamento térmico e do tipo de correcção térmica. Em cada quadro é exibida uma representação esquemática da ponte térmica, as distribuições das linhas de fluxo de calor e das temperaturas para as correcções térmicas consideradas. Para além das representações gráficas, faz-se uma exposição dos valores do coeficiente de transmissão térmica lineares (ψ) obtidos através do programa BISCO (2006), da tabela A.2 da Norma Europeia EN ISO 14683 (2007) e da tabela IV.3 do RCCTE (2006).

Para avaliar o impacto do aumento da espessura no valor de ψ , foram empregues, nos vários pormenores construtivos, diferentes espessuras de isolamento térmico. Posteriormente, são apresentados graficamente os valores de ψ , em função da variação da espessura de isolamento térmico, para as várias soluções consideradas.

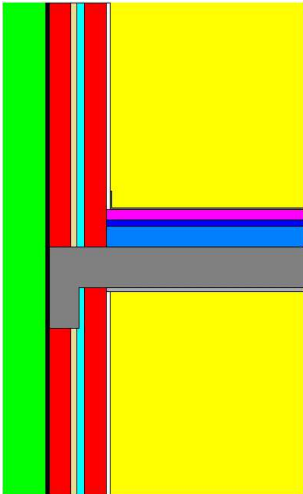
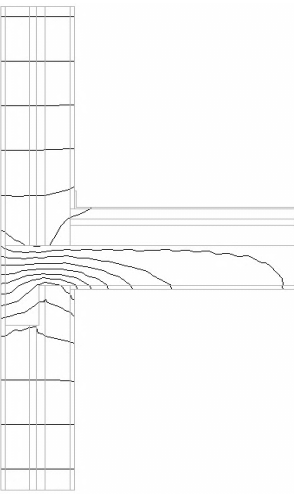
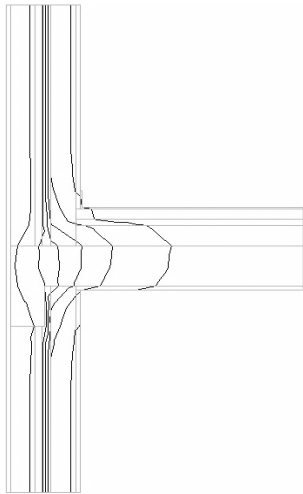
5.3.4.1 Ligação da fachada com pavimentos intermédios

i) Parede dupla com isolamento na caixa-de-ar

As pontes térmicas que se seguem, referentes à ligação da fachada com o pavimento intermédio, apresentam parede dupla na zona corrente da fachada, com isolamento térmico na caixa-de-ar, compreendido entre os dois panos, conforme apresentado no subcapítulo 5.3.1.

No primeiro caso, referente à ponte térmica P.T.Ar1 (Quadro 5.3), a correcção térmica do elemento estrutural realiza-se pelo interior, com a aplicação de isolamento térmico com 3cm de espessura na zona interior da ponte térmica plana, de modo a garantir a continuidade do mesmo.

Quadro 5.3 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Ar1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Ar1			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,85	0,40	0,65
B	0,82	0,40	0,65
C	0,78	0,40	0,65

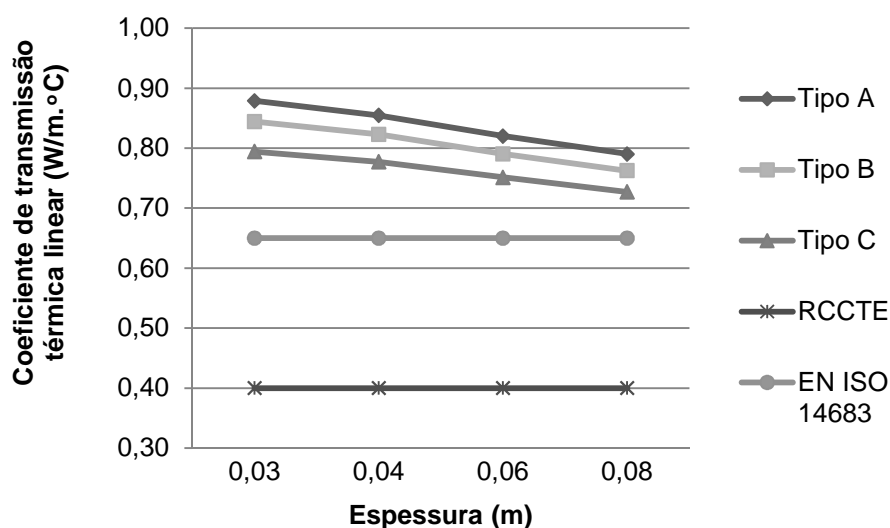
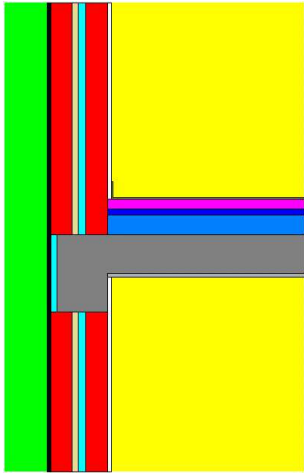
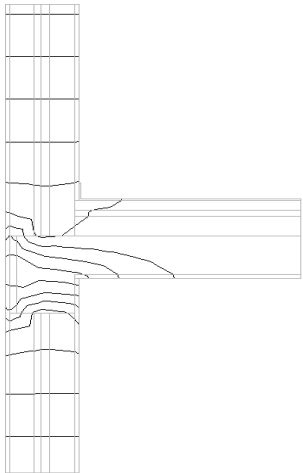
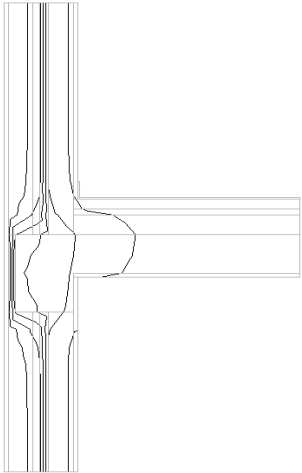


Figura 5.7 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ar1

No caso da ponte térmica P.T.Ar2 (Quadro 5.4), a correcção térmica do elemento estrutural realiza-se pelo exterior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura. Apesar de conferir protecção ao elemento estrutural, não se garante a continuidade do isolamento térmico.

Quadro 5.4 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Ar2

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Ar2			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,69	0,40	0,65
B	0,69	0,40	0,65
C	0,67	0,40	0,65

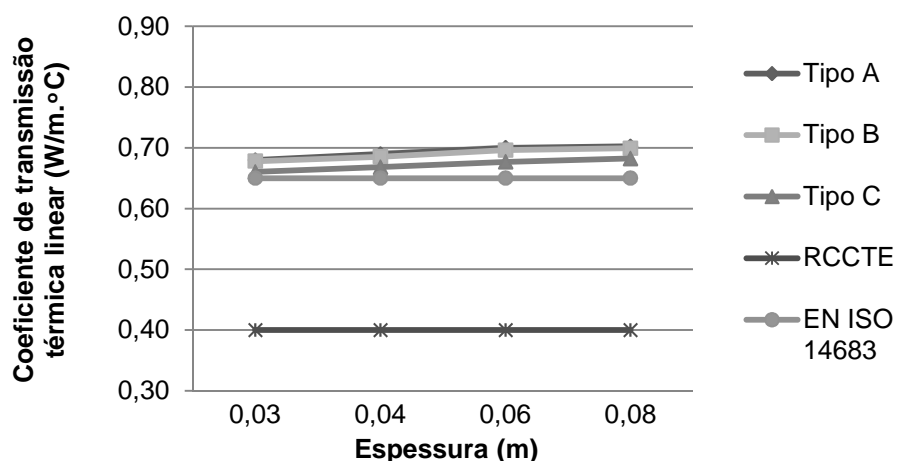


Figura 5.8 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ar2

No caso da P.T.Ar3 (Quadro 5.5), a correcção térmica do elemento estrutural realiza-se pelo exterior, com a aplicação de uma forra cerâmica com 3cm de espessura, e pelo interior, com isolamento térmico e uma forra cerâmica, ambos com 4cm de espessura. Contudo, neste caso, existe uma pequena descontinuidade no isolamento térmico.

Quadro 5.5 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Ar3

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Ar3			
Tipo de parede	ψ_{BISCO} [$\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$]	ψ_{RCCTE} [$\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$]	$\psi_{\text{ISO 14683}}$ [$\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$]
A	1,00	0,40	0,65
B	0,95	0,40	0,65
C	0,92	0,40	0,65

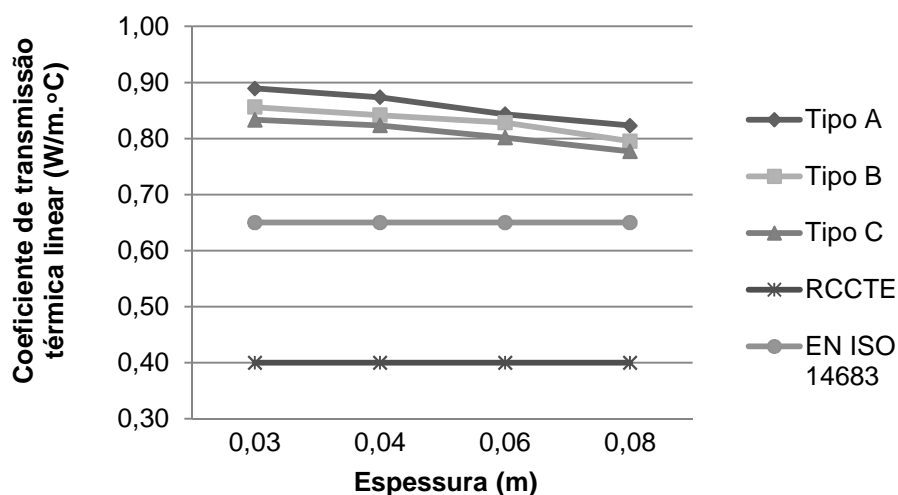
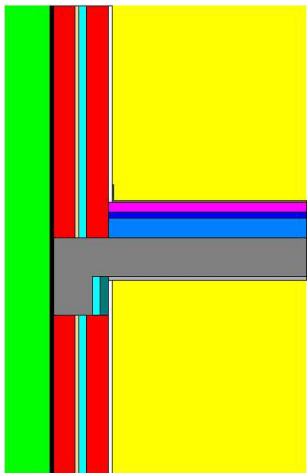
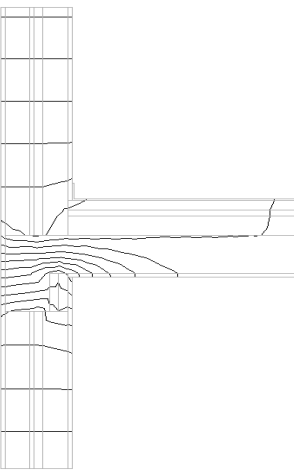
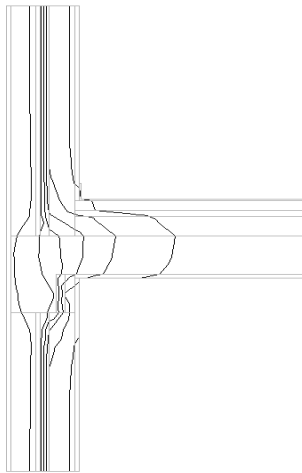


Figura 5.9 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ar3

Na ponte térmica P.T.Ar4 (Quadro 5.6), a correcção térmica do elemento estrutural faz-se pelo interior, com isolamento térmico e uma forra cerâmica, ambos com 4cm de espessura. Neste caso, à semelhança do caso anterior, não se garante a continuidade do isolamento térmico.

Quadro 5.6 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Ar4

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Ar4			
Tipo de parede	$\psi_{\text{BISCO}} [\text{W/m.}^\circ\text{C}]$	$\psi_{\text{RCCTE}} [\text{W/m.}^\circ\text{C}]$	$\psi_{\text{ISO 14683}} [\text{W/m.}^\circ\text{C}]$
A	0,87	0,40	0,65
B	0,84	0,40	0,65
C	0,82	0,40	0,65

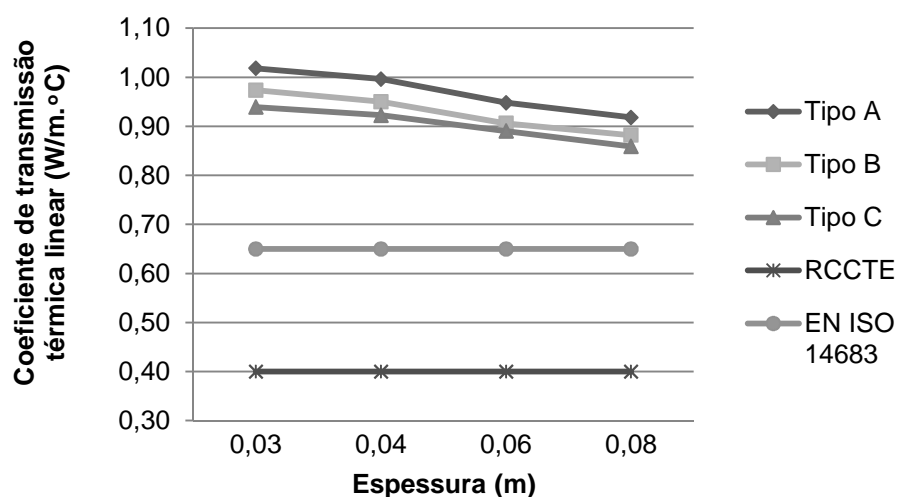


Figura 5.10 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ar4

No caso da ponte térmica P.T.Ar5 (Quadro 5.7), a correcção térmica do elemento estrutural (viga) realiza-se pelo exterior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura. Nesta situação, garante-se a continuidade do isolamento térmico.

Quadro 5.7 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Ar5

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Ar5			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,26	0,40	0,65
B	0,26	0,40	0,65
C	0,28	0,40	0,65

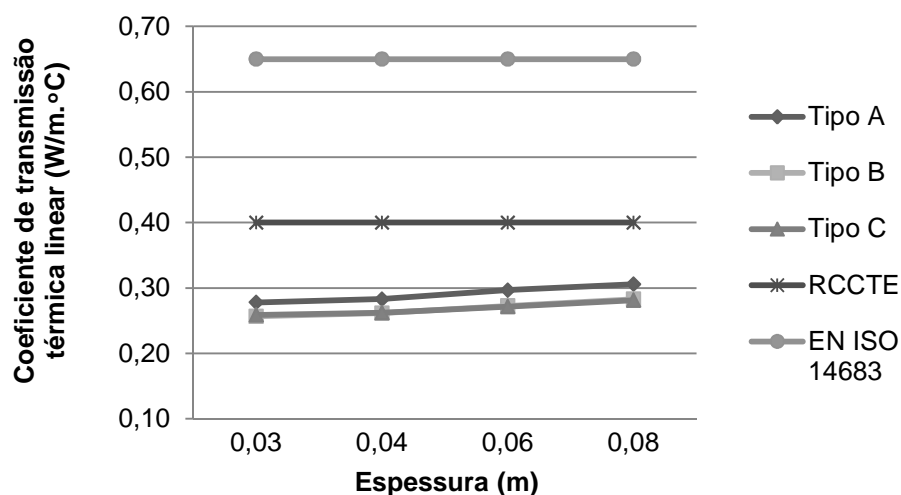
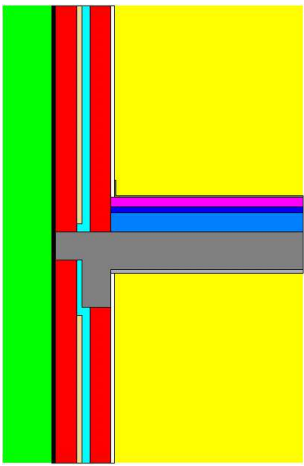
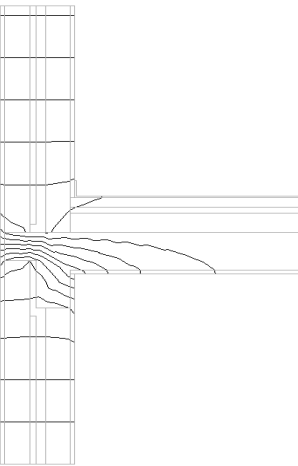
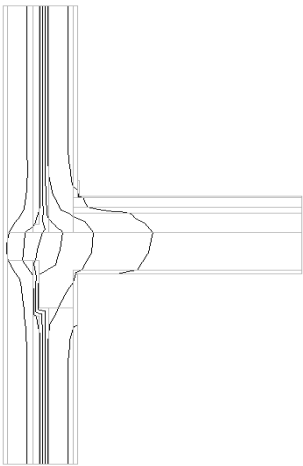


Figura 5.11 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ar5

Na ponte térmica P.T.Ar6 (Quadro 5.8), a correcção térmica do elemento estrutural (viga) faz-se pelo exterior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura, na zona exterior da ponte térmica plana. Neste caso, garante-se a continuidade do isolamento térmico.

Quadro 5.8 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede dupla com isolamento na caixa-de ar - P.T.Ar6

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Ar6			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,72	0,40	0,65
B	0,75	0,40	0,65
C	0,80	0,40	0,65

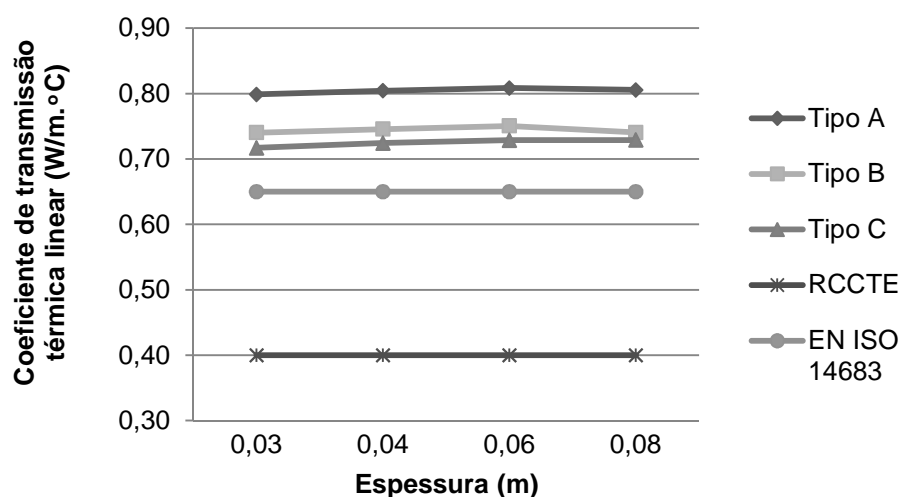


Figura 5.12 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ar6

Após a observação dos vários quadros, verifica-se que na zona corrente o fluxo de calor propaga-se perpendicularmente ao elemento construtivo, de forma unidireccional, como seria de esperar. Contudo, na zona de ponte térmica existe uma grande concentração de linhas de fluxo de calor devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), isto é, o fluxo de calor dirige-se na direcção da laje e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, porém, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção dos elementos verticais com o elemento horizontal, o que pode levar a ocorrência de condensações superficiais localizadas.

Quando a correcção térmica é concretizada de modo a garantir a continuidade do isolamento térmico, observa-se que existe uma menor concentração de linhas de fluxo de calor e a distribuição da temperatura é mais homogénea (P.T.Ar5), comparativamente aos restantes casos. Consequentemente, nestes casos, ocorre uma diminuição do valor de ψ , uma vez que as perdas térmicas são inferiores às verificadas para as soluções de correcção térmica sem continuidade do isolamento térmico (por exemplo, P.T.Ar2).

Como se constata pela ponte térmica P.T.Ar1, o RCCTE (2006) apresenta valores de ψ inferiores aos obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006), para os três tipos de parede analisadas (A, B e C), logo é menos conservativo. Contudo, no caso da P.T.Ar2 existe proximidade entre os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) e da Norma Europeia EN ISO 14683 (2007), para os três tipos de parede.

No que se refere ao impacto do aumento da espessura do isolamento térmico no valor de ψ , constata-se que para as pontes térmicas P.T.Ar1, P.T.Ar3 e P.T.Ar4, para os três tipos de parede (A, B e C), ocorre uma diminuição do seu valor à medida que a espessura aumenta. Assim, para esta situação em particular, é notória a importância do isolamento térmico nas zonas de pontes térmicas.

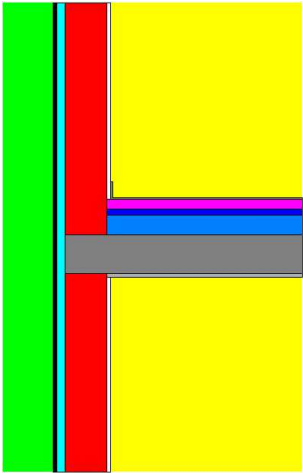
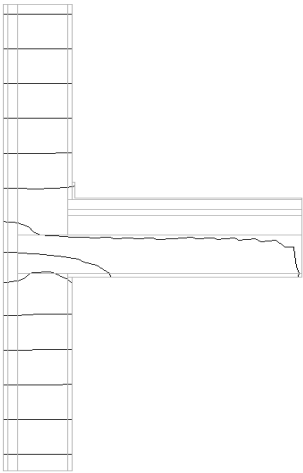
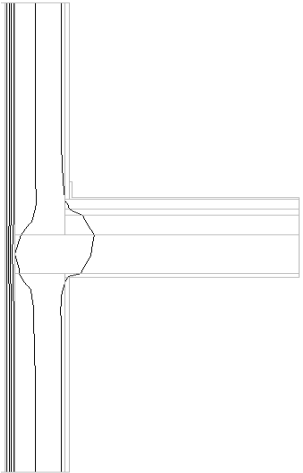
Quanto às restantes pontes térmicas (P.T.Ar2, P.T.Ar5 e P.T.Ar6), à medida que a espessura aumenta o valor de ψ permanece aproximadamente constante ou aumenta ligeiramente. Assim, para estas três soluções em concreto, o aumento da espessura do isolamento térmico não traz vantagens suplementares.

A análise gráfica permite também verificar que a variação da espessura da parede provoca um decréscimo no valor de ψ , contudo, em geral, essa diminuição é pouco significativa.

ii) Parede simples com isolamento pelo exterior

A ponte térmica P.T.Ae1 que se apresenta de seguida (Quadro 5.9), referente à ligação da fachada com o pavimento intermédio, apresenta parede simples na zona corrente da fachada, com isolamento térmico contínuo pelo exterior, conforme exposto no subcapítulo 5.3.1.

Quadro 5.9 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.Ae1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Ae1			
Tipo de parede	ψ_{BISCO} [W/m.°C]	ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
D	0,29	0,20	0,10
E	0,26	0,20	0,10
F	0,26	0,20	0,10

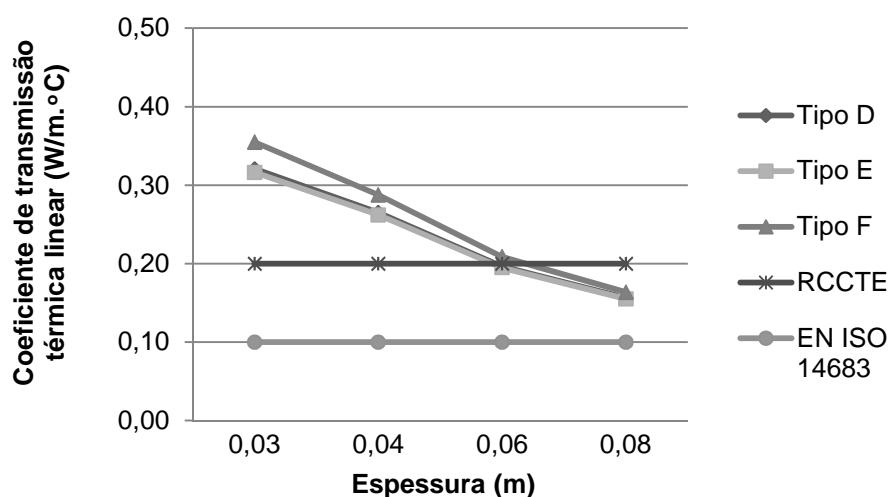


Figura 5.13 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ae1

Após a observação do Quadro 5.9, verifica-se que na zona corrente o fluxo de calor propaga-se perpendicularmente ao elemento construtivo, de forma unidireccional, como seria de esperar. Contudo, na zona de ponte térmica, à semelhança dos casos anteriores, devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), o fluxo de calor dirige-se na direcção da laje e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, no entanto, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção dos elementos verticais com o horizontal, tal como acontece para as soluções anteriores.

Como se verifica pela ponte térmica P.T.Ae1, os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) são semelhantes aos valores do RCCTE (2006) e da Norma Europeia EN ISO 14863 (2007), para os três tipos de parede analisadas (D, E e F), no entanto, neste caso específico, a norma europeia é menos conservativa.

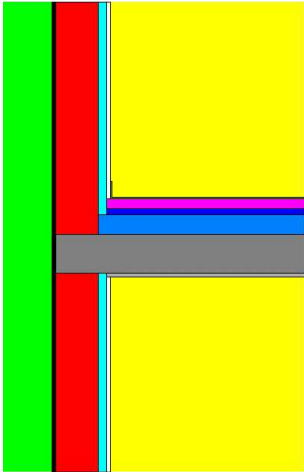
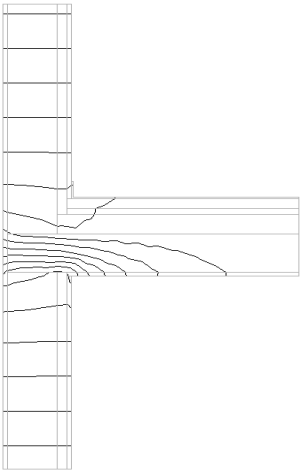
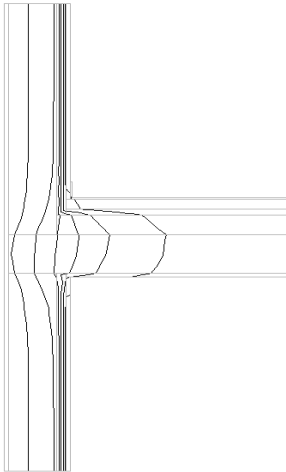
No que se refere ao impacte do aumento da espessura do isolamento térmico no valor de ψ , ocorre uma grande diminuição do seu valor à medida que a espessura aumenta, para os três tipos de parede (D, E e F). A análise gráfica permite ainda verificar que a variação da espessura da parede quase que não se reflecte no valor de ψ .

iii) Parede simples com isolamento pelo interior

As pontes térmicas seguintes, referentes à ligação da fachada com o pavimento intermédio, apresentam parede simples na zona corrente da fachada, com isolamento térmico pelo interior, conforme referido no subcapítulo 5.3.1.

No caso da ponte térmica P.T.Ai1 (Quadro 5.10) não se recorre a qualquer tipo de correcção térmica, contudo, na P.T.Ai2 (Quadro 5.11) a correcção faz-se pelo exterior do bordo da laje, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura.

Quadro 5.10 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede simples com isolamento pelo interior - P.T.Ai1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Ai1			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
G	1,02	0,80	1,00
H	0,79	0,70	1,00
I	0,75	0,70	1,00

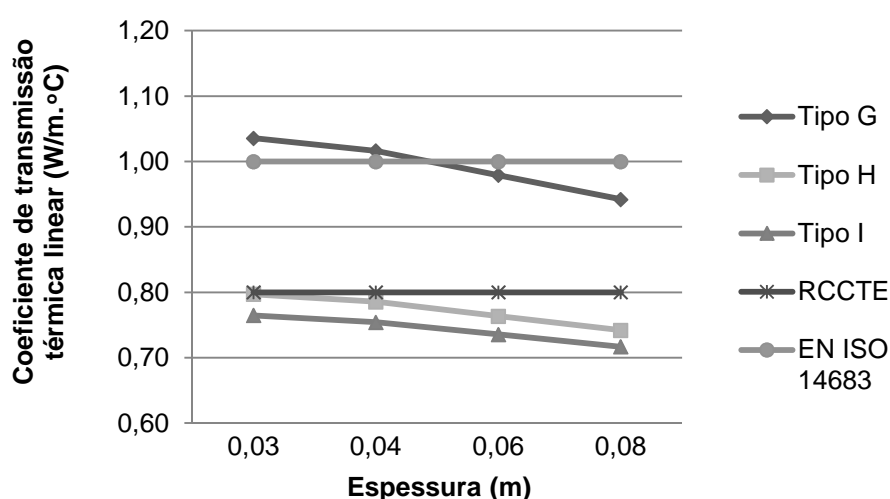
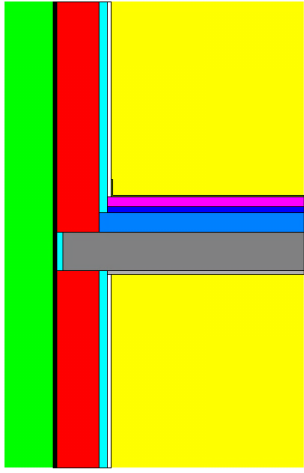
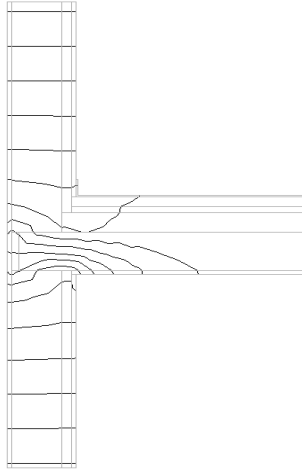
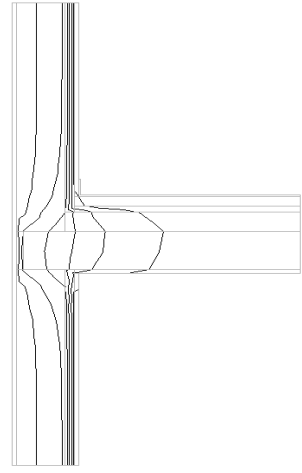


Figura 5.14 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ai1

Quadro 5.11 – Ligação da fachada com pavimentos intermédios - parede simples com isolamento pelo interior - P.T.Ai2

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Ai2			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
G	0,96	0,80	0,80
H	0,63	0,70	0,80
I	0,62	0,70	0,80

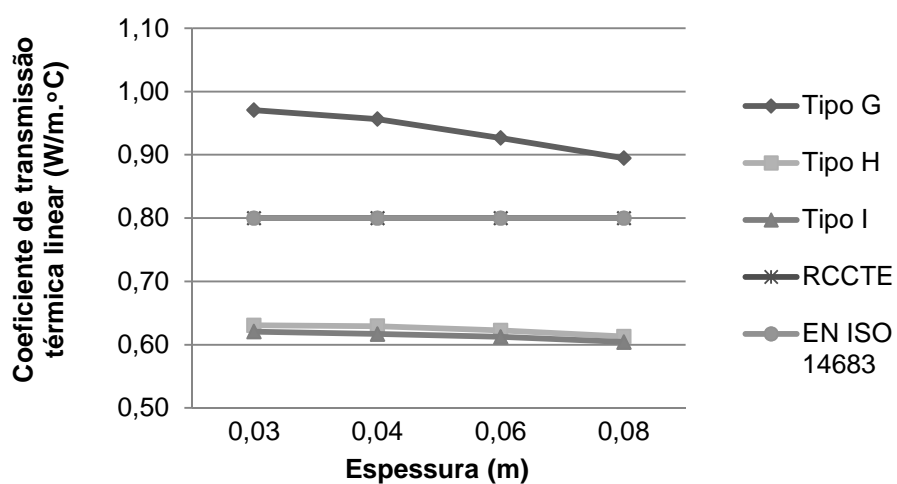


Figura 5.15 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ai2

Após a observação do Quadro 5.10 e Quadro 5.11, verifica-se que na zona corrente o fluxo de calor propaga-se perpendicularmente ao elemento construtivo, de forma unidireccional, como seria de esperar. Contudo, na zona de ponte térmica existe uma grande concentração de linhas de fluxo de calor devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), isto é, o fluxo de calor dirige-se na direcção da laje e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, no entanto, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção dos elementos verticais com o horizontal, tal como acontece para as soluções anteriores.

Os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) para as pontes térmicas P.T.Ai1 e P.T.Ai2 são semelhantes aos valores do RCCTE (2006) e da Norma Europeia EN ISO 14863 (2007), para os três tipos de parede analisadas (D, E e F), no entanto, neste caso específico, o regulamento português é o menos conservativo.

No que se refere ao impacte do aumento da espessura do isolamento térmico no valor de ψ , ocorre uma diminuição do seu valor à medida que a espessura aumenta, para os três tipos de parede (D, E e F). Contudo, no caso da P.T.Ai2, para as soluções construtivas com paredes tipo H e I essa diminuição é pouco significativa. A análise gráfica permite também verificar que a variação da espessura da parede reflecte-se no valor de ψ , pois para os pormenores construtivos com parede tipo G os valores são mais elevados, ou seja, as perdas de calor são superiores.

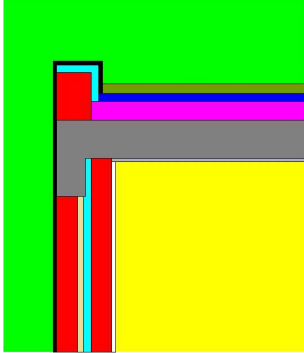
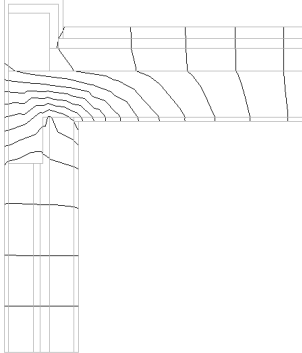
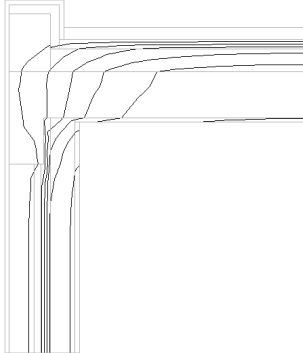
5.3.4.2 Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço

i) Parede dupla com isolamento na caixa-de-ar

As pontes térmicas que se seguem, referentes à ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço, apresentam parede dupla na zona corrente da fachada, com isolamento térmico na caixa-de-ar, compreendido entre os dois panos, conforme apresentado no subcapítulo 5.3.1.

No primeiro caso, referente à ponte térmica P.T.Br1 (Quadro 5.12), a correcção térmica do elemento estrutural realiza-se pelo interior, com a aplicação de isolamento térmico com 3cm de espessura na zona interior da ponte térmica plana, de modo a garantir a continuidade do mesmo.

Quadro 5.12 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Br1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Br1			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,69	0,60	0,70
B	0,69	0,60	0,70
C	0,64	0,60	0,70

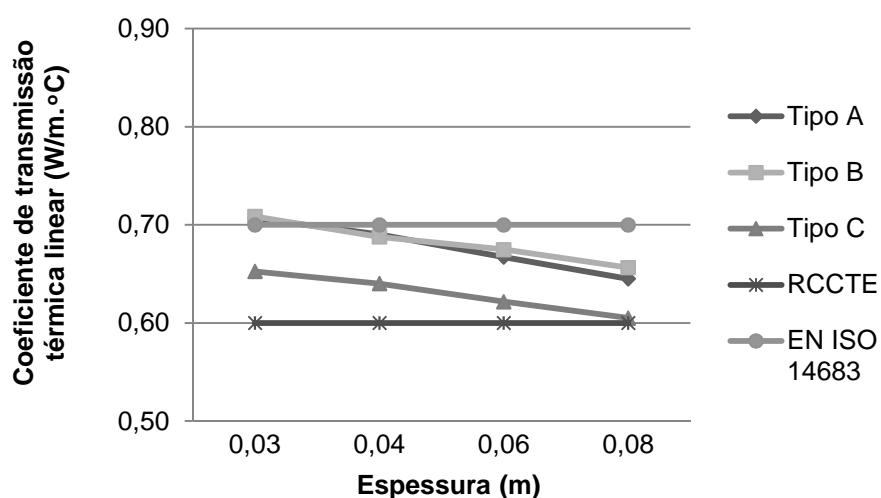
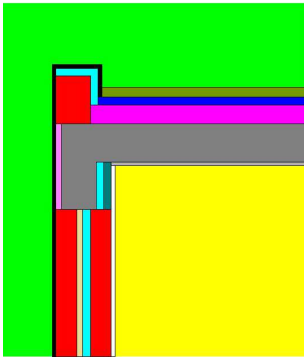
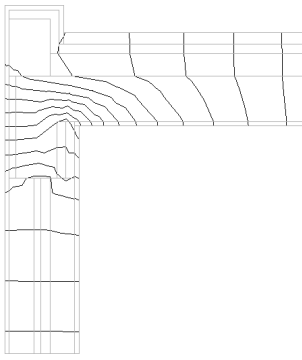
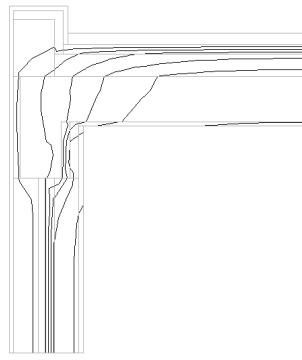
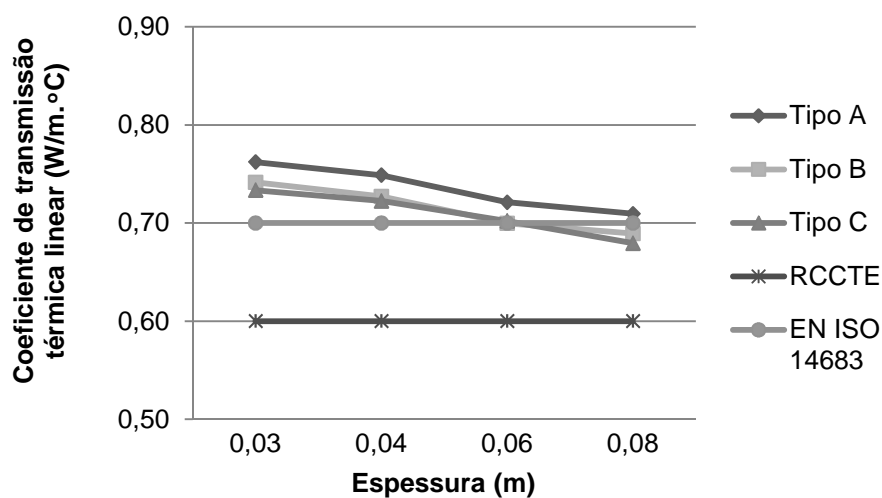


Figura 5.16 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Br1

No caso da ponte térmica P.T.Br2 (Quadro 5.13), a correcção térmica do elemento estrutural realiza-se pelo exterior, com a aplicação de uma forra cerâmica com 3cm de espessura, e pelo interior, com isolamento térmico e uma forra cerâmica, ambos com 4cm de espessura. Contudo, neste caso em particular, existe uma pequena descontinuidade no isolamento térmico.

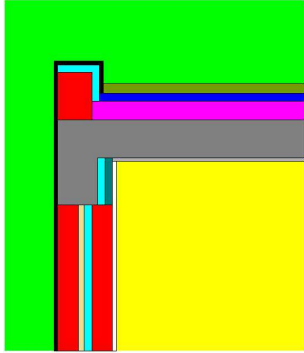
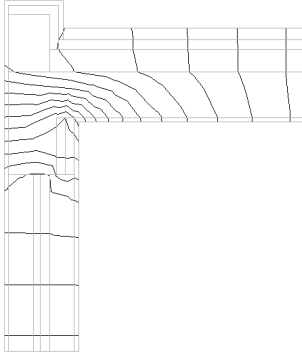
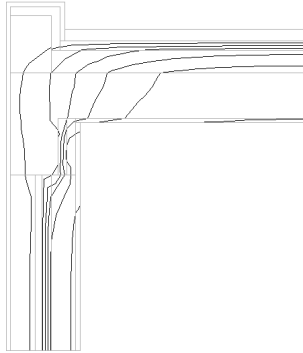
Quadro 5.13 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Br2

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Br2			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,75	0,60	0,70
B	0,73	0,60	0,70
C	0,72	0,60	0,70


Figura 5.17 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Br2

Na ponte térmica P.T.Br3 (Quadro 5.14), a correcção térmica do elemento estrutural faz-se pelo interior, com isolamento térmico e uma forra cerâmica, ambos com 4cm de espessura. Neste caso, à semelhança do caso anterior, não se garante a continuidade do isolamento térmico.

Quadro 5.14 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Br3

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Br3			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,83	0,60	0,70
B	0,80	0,60	0,70
C	0,79	0,60	0,70

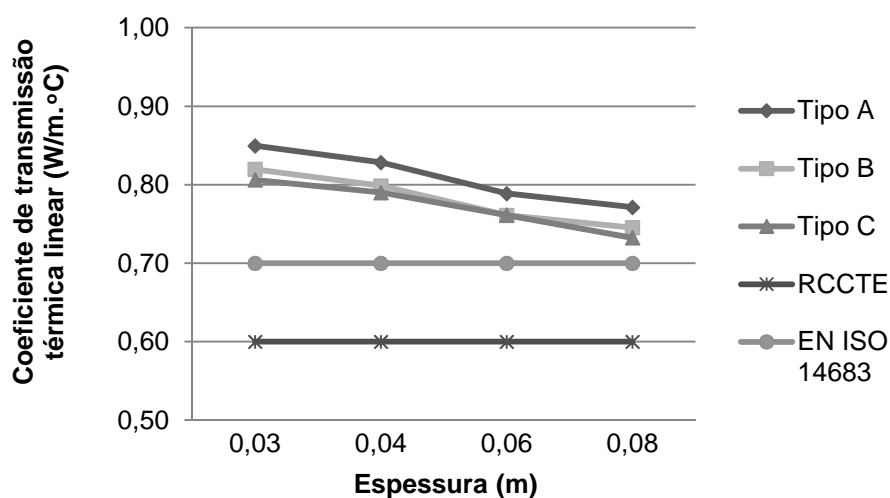
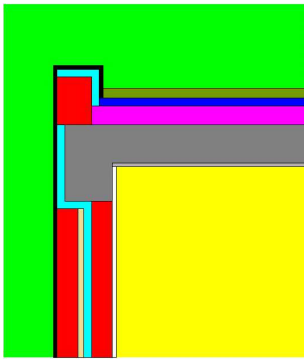
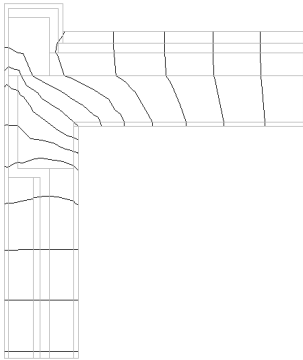
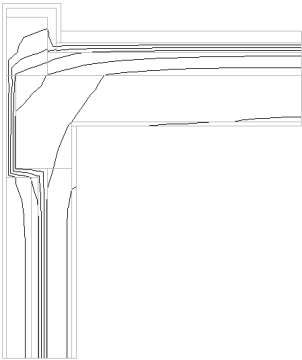
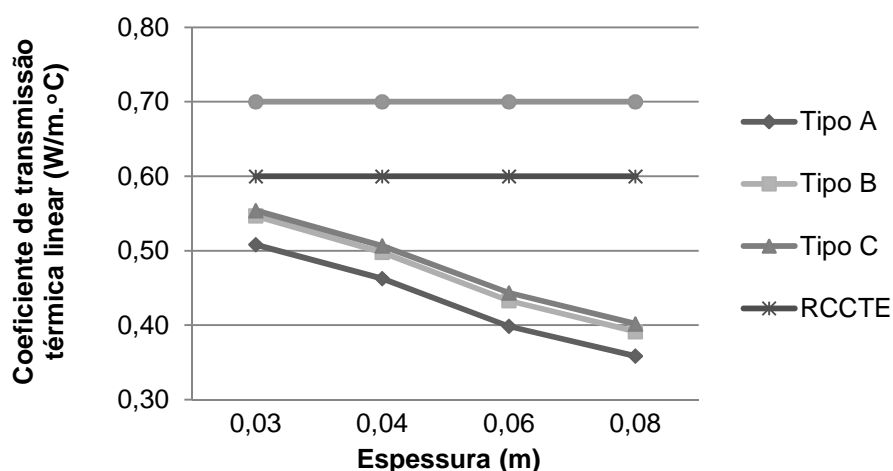


Figura 5.18 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Br3

Na ponte térmica P.T.Br4 (Quadro 5.15), a correcção térmica do elemento estrutural realiza-se pelo interior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura pelo exterior, de modo a garantir a continuidade do mesmo.

Quadro 5.15 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Br4

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Br4			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,46	0,60	0,70
B	0,50	0,60	0,70
C	0,51	0,60	0,70

**Figura 5.19** – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Br4

Após a observação dos vários quadros, verifica-se que na zona de ponte térmica existe uma grande concentração de linhas de fluxo de calor devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), ou seja, o fluxo de calor dirige-se na direcção da laje e apresenta componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, porém, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção dos elementos verticais com o horizontal, o que pode levar ao aparecimento de condensações superficiais localizadas.

Quando a correcção térmica é concretizada de modo a garantir a continuidade do isolamento térmico, observa-se que existe uma menor concentração de linhas de fluxo de calor e a distribuição da temperatura é um pouco mais homogénea (P.T.Br4), comparativamente aos restantes casos. Consequentemente, nestes casos, ocorre uma diminuição do valor de ψ , uma vez que as perdas térmicas são inferiores às verificadas para as soluções de correcção térmica sem continuidade do isolamento térmico (por exemplo, P.T.Br3).

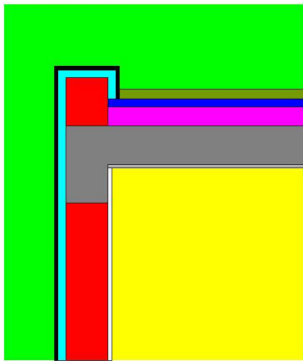
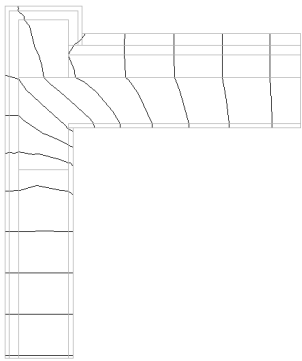
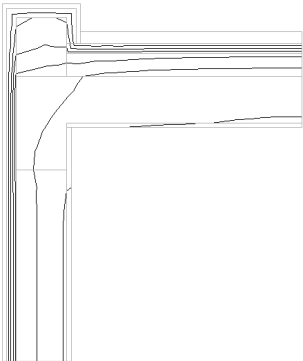
Como se verifica pela ponte térmica P.T.Br1, o RCCTE (2006) e a Norma Europeia EN ISO 14683 (2007) apresentam valores de ψ aproximados dos obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006), para os três tipos de parede analisadas (A, B e C). Contudo, o RCCTE é o que apresenta valores mais baixos, ou seja, é o menos conservativo.

No que se refere à análise gráfica, constata-se que, para todos os pormenores construtivos, ocorre uma diminuição do valor ψ à medida que a espessura aumenta. Para além disso, verifica-se que a variação da espessura da parede provoca um decréscimo no valor de ψ , contudo, essa diminuição é pouco significativa, como se pode constatar nos gráficos apresentados anteriormente.

ii) Parede simples com isolamento pelo exterior

A ponte térmica P.T.Be1 que se apresenta de seguida (Quadro 5.16), referente à ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço, apresenta parede simples na zona corrente da fachada, com isolamento térmico contínuo pelo exterior.

Quadro 5.16 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.Be1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Be1			
Tipo de parede	ψ_{BISCO} [W/m.°C]	ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
D	0,35	0,45	0,25
E	0,33	0,45	0,25
F	0,33	0,45	0,25

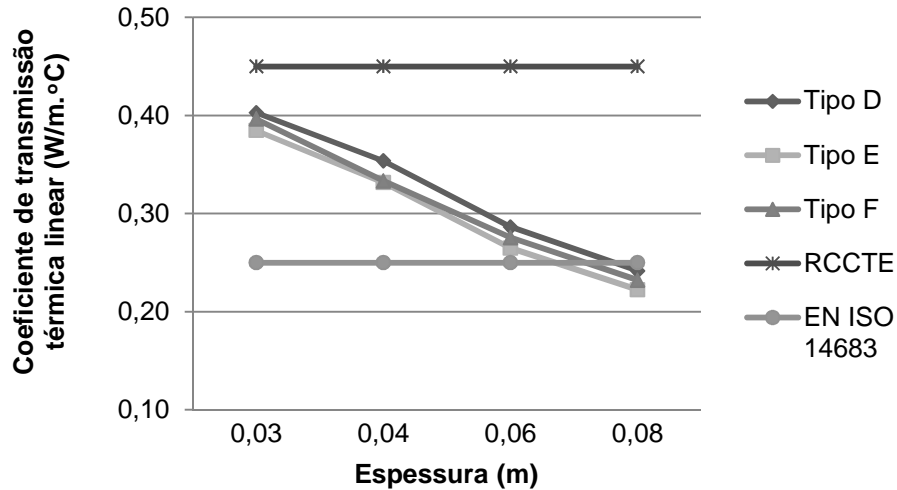


Figura 5.20 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Be1

Após a observação do Quadro 5.16, verifica-se que na zona corrente o fluxo de calor propaga-se perpendicularmente ao elemento construtivo, de forma unidireccional, como seria de esperar. Contudo, na zona de ponte térmica, devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), o fluxo de calor dirige-se na direcção da laje e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, no entanto, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção dos elementos verticais com o horizontal.

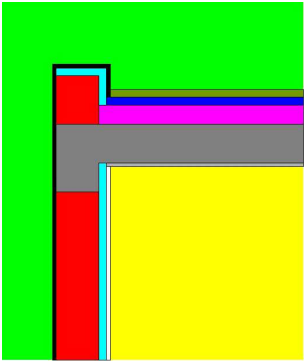
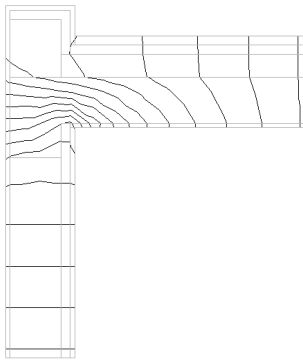
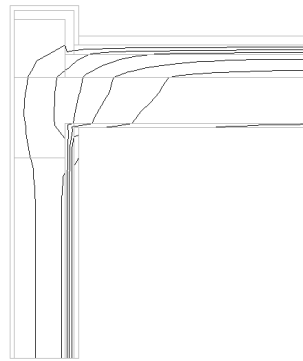
Como se verifica pela ponte térmica P.T.Be1, os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) são semelhantes aos valores do RCCTE (2006) e da Norma Europeia EN ISO 14863 (2007), para os três tipos de parede analisadas (D, E e F), porém, a norma europeia é menos conservativa.

No que se refere à análise gráfica, constata-se que ocorre uma diminuição do valor ψ à medida que a espessura aumenta. Para além disso, a variação da espessura da parede provoca um decréscimo no valor de ψ , no entanto, essa diminuição é pouco significativa.

iii) Parede simples com isolamento pelo interior

A ponte térmica P.T.Bi1 que se apresenta de seguida (Quadro 5.17), referente à ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço, apresenta parede simples na zona corrente da fachada, com isolamento térmico contínuo pelo interior.

Quadro 5.17 – Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço - parede simples com isolamento pelo interior - P.T.Bi1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Bi1			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
G	0,78	0,75	0,85
H	0,70	0,75	0,85
I	0,67	0,75	0,85

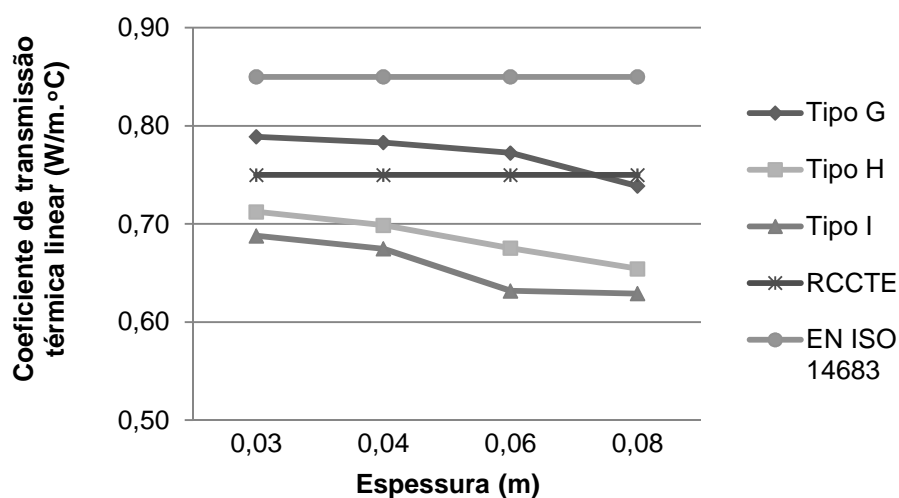


Figura 5.21 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Bi1

Após observação do Quadro 5.17, verifica-se que na zona corrente o fluxo de calor propaga-se perpendicularmente ao elemento construtivo, de forma unidireccional, como seria de esperar. Contudo, na zona de ponte térmica existe uma grande concentração de linhas de fluxo de calor devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), isto é, o fluxo de calor dirige-se na direcção da laje e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, no entanto, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção dos elementos verticais com o horizontal.

Como se constata pela P.T.Bi1, os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) são semelhantes aos valores do RCCTE (2006) e da Norma Europeia EN ISO 14863 (2007), para os três tipos de parede analisadas (G, H e I), porém, o regulamento português é o menos conservativo.

No que se refere ao impacto do aumento da espessura do isolamento térmico no valor de ψ , ocorre uma diminuição do seu valor à medida que a espessura da parede aumenta, para os três tipos de parede referidos anteriormente. Para além disso, a variação da espessura da parede provoca um decréscimo considerável no valor de ψ , que não deve ser desprezado.

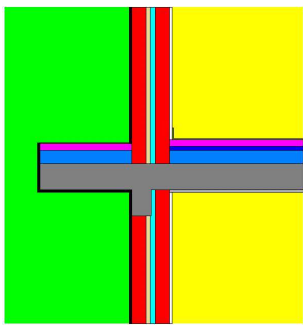
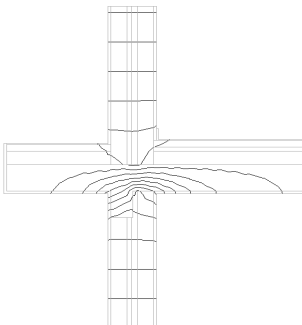
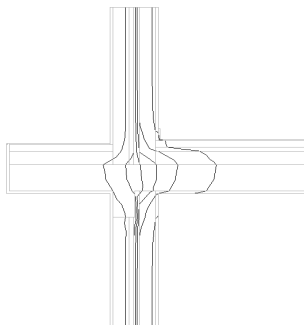
5.3.4.3 Ligação da fachada com varanda

i) Parede com material de isolamento na caixa-de-ar

As pontes térmicas que se seguem, relativas à ligação da fachada com varanda, apresentam parede dupla na zona corrente da fachada, com isolamento térmico na caixa-de-ar, compreendido entre os dois panos.

No primeiro caso, relativo à ponte térmica P.T.Cr1 (Quadro 5.18), a correcção térmica do elemento estrutural realiza-se pelo interior, com a aplicação de isolamento térmico com 3cm de espessura na zona interior da ponte térmica plana, de modo a garantir a continuidade do mesmo.

Quadro 5.18 – Ligação da fachada com varanda - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Cr1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Cr1			
Tipo de parede	ψ_{BISCO} [W/m.°C]	ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\psi_{\text{ISO 14863}}$ [W/m.°C]
A	0,80	0,90	1,05
B	0,77	0,80	1,05
C	0,73	0,80	1,05

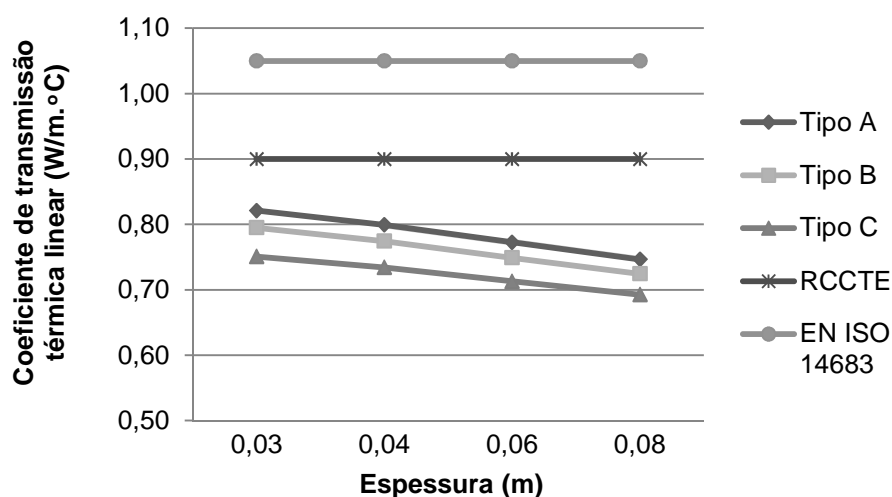


Figura 5.22 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Cr1

No caso da ponte térmica P.T.Cr2 (Quadro 5.19), a correcção térmica do elemento estrutural realiza-se pelo exterior, com a aplicação de uma forra cerâmica com 3cm de espessura, e pelo interior, com isolamento térmico e uma forra cerâmica, ambos com 4cm de espessura. Contudo, neste caso em particular, existe uma pequena descontinuidade no isolamento térmico.

Quadro 5.19 – Ligação da fachada com varanda - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Cr2

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Cr2			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,87	0,90	1,05
B	0,84	0,80	1,05
C	0,82	0,80	1,05

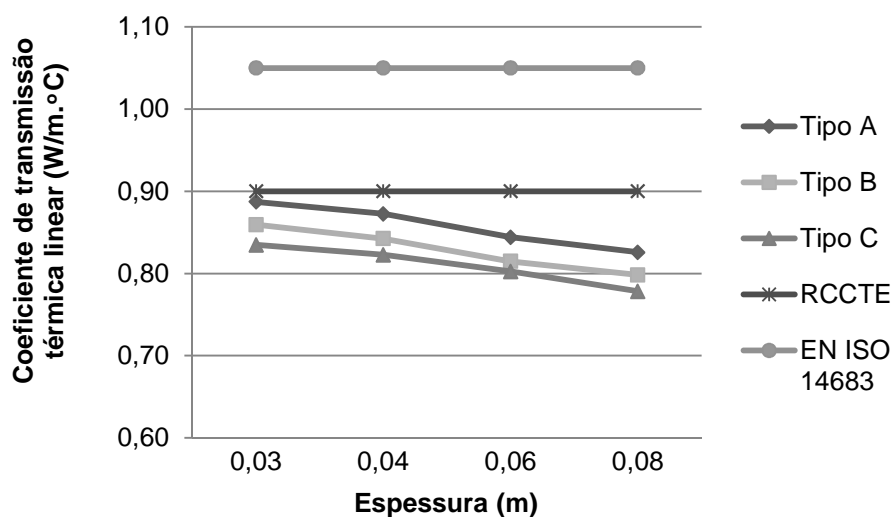
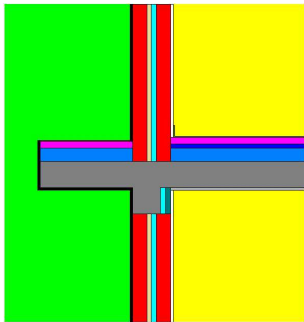
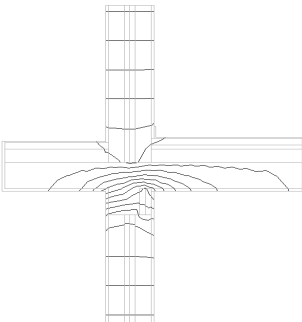
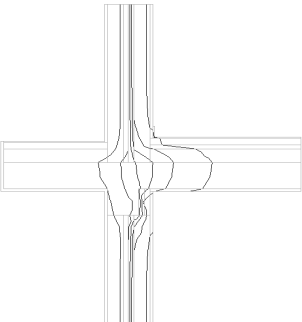


Figura 5.23 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Cr2

Na ponte térmica P.T.Cr3 (Quadro 5.20), a correcção térmica do elemento estrutural faz-se pelo interior, com isolamento térmico e uma forra cerâmica, ambos com 4cm de espessura. Neste caso, à semelhança do caso anterior, não se garante a continuidade do isolamento térmico.

Quadro 5.20 – Ligação da fachada com varanda - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Cr3

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Cr3			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,93	0,90	1,05
B	0,88	0,80	1,05
C	0,86	0,80	1,05

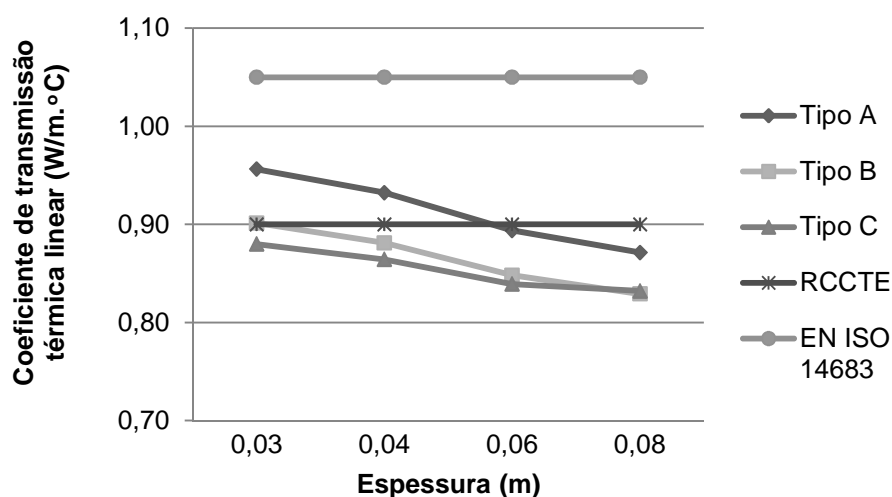


Figura 5.24 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Cr3

Na ponte térmica P.T.Cr4 (Quadro 5.21), a correcção térmica do elemento estrutural faz-se pelo exterior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura, de modo a garantir a continuidade do mesmo.

Quadro 5.21 – Ligação da fachada com varanda - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Cr4

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Cr4			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	1,00	0,90	1,05
B	0,87	0,80	1,05
C	0,84	0,80	1,05

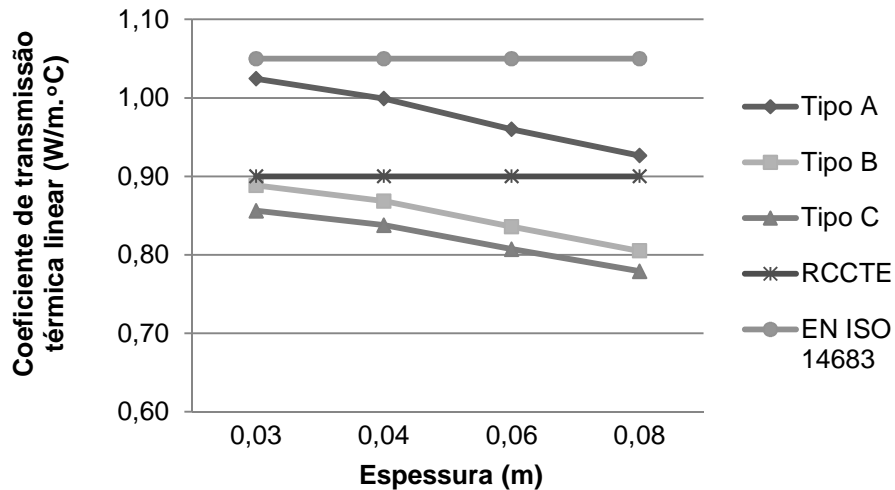


Figura 5.25 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Cr4

Depois de analisados os vários quadros, verifica-se que na zona de ponte térmica existe uma grande concentração de linhas de fluxo de calor devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), isto é, o fluxo de calor dirige-se na direcção da laje e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, porém, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção dos elementos verticais com o horizontal, o que pode levar ao aparecimento de condensações superficiais localizadas.

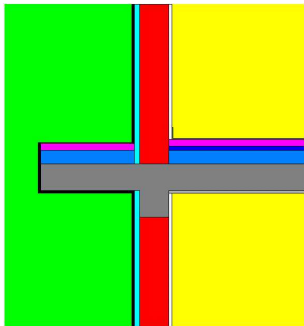
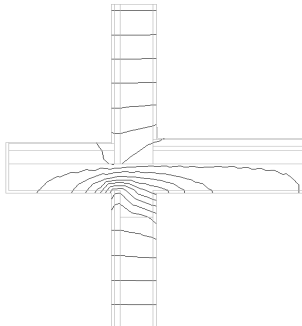
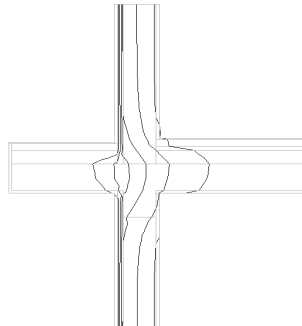
Como se constata através da ponte térmica P.T.Cr1, o RCCTE (2006) e a Norma Europeia EN ISO 14683 (2007) apresentam valores de ψ aproximados aos obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006), para os três tipos de parede analisadas (A, B e C). No entanto, o RCCTE (2006) é o que apresenta valores mais baixos, ou seja, é o menos conservativo.

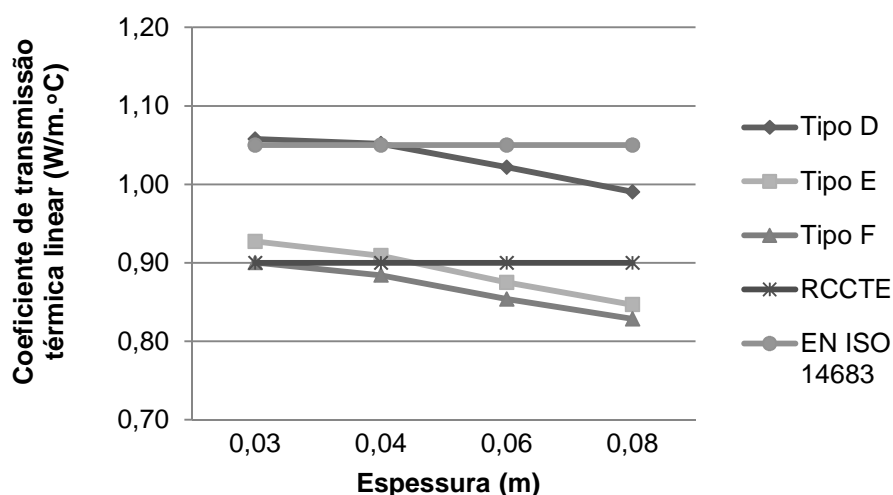
No que se refere à análise gráfica, constata-se que ocorre uma diminuição do valor ψ à medida que a espessura aumenta. Para além disso, verifica-se que a variação da espessura da parede provoca um decréscimo no valor de ψ , contudo, essa diminuição é pouco significativa, à excepção da ponte térmica P.T.Cr4.

ii) Parede simples com isolamento pelo exterior

A ponte térmica P.T.Ce1 que se apresenta de seguida (Quadro 5.22), referente à ligação da fachada com varanda, apresenta parede simples na zona corrente da fachada, com isolamento térmico contínuo pelo exterior. Assim, garante-se a correcção térmica pelo exterior da ponte térmica plana.

Quadro 5.22 – Ligação da fachada com varanda - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.Ce1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Ce1			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
D	1,05	0,90	1,05
E	0,91	0,80	1,05
F	0,88	0,80	1,05

**Figura 5.26** – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ce1

Após observação do Quadro 5.22, verifica-se que na zona de ponte térmica existe uma grande concentração de linhas de fluxo de calor devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), isto é, o fluxo de calor dirige-se na direcção da laje e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, no entanto, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção dos elementos verticais com o horizontal.

Como se constata pela P.T.Ce1, os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) são semelhantes aos valores do RCCTE (2006) e da Norma Europeia EN ISO 14683

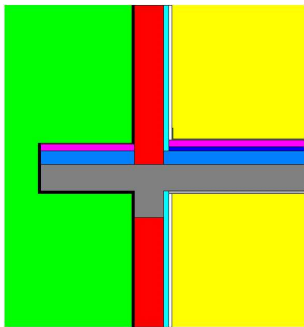
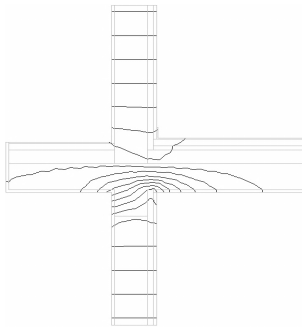
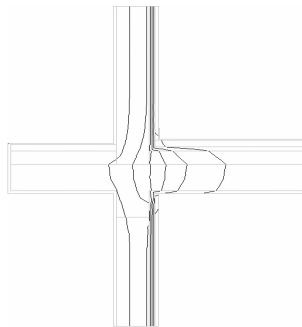
(2007), para os três tipos de parede analisadas (D, E e F), porém, o regulamento português é menos conservativo.

No que se refere à análise gráfica, verifica-se uma diminuição do valor de ψ à medida que a espessura aumenta. Para além disso, a variação da espessura da parede provoca um decréscimo considerável no valor de ψ , que não deve ser desprezado.

iii) Parede simples com isolamento pelo interior

A ponte térmica P.T.Ci1 que se apresenta de seguida (Quadro 5.23), referente à ligação da fachada com varanda, apresenta parede simples na zona corrente da fachada, com isolamento térmico contínuo pelo interior.

Quadro 5.23 – Ligação da fachada com varanda - parede simples com isolamento pelo interior - P.T.Ci1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Ci1			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
G	0,96	0,90	1,00
H	0,85	0,80	1,00
I	0,82	0,80	1,00

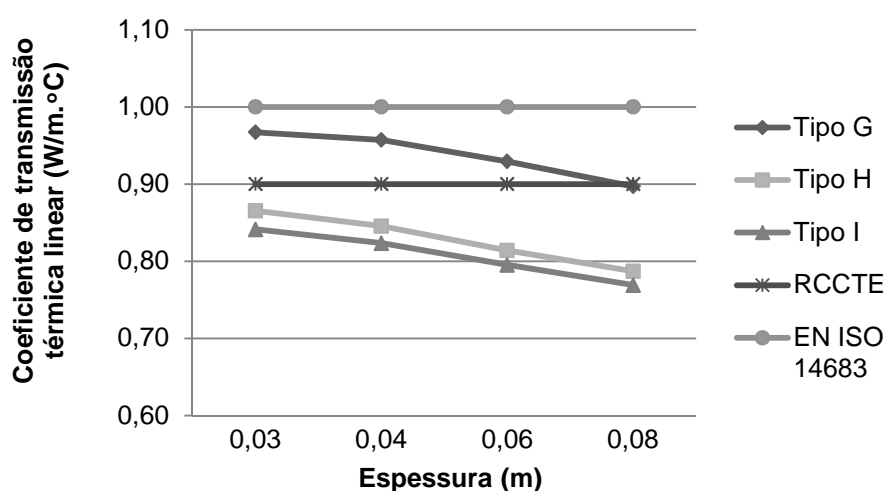


Figura 5.27 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ci1

Após observação do Quadro 5.23, verifica-se que na zona de ponte térmica existe uma grande concentração de linhas de fluxo de calor devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), isto é, o fluxo de calor dirige-se na direcção da laje e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, no entanto, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção dos elementos verticais com o horizontal.

Como se constata pela ponte térmica P.T.Ci1, os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) são semelhantes aos valores do RCCTE (2006) e da Norma Europeia EN ISO 14863 (2007), para os três tipos de parede analisadas (G, H e I), porém, o regulamento português é o menos conservativo.

No que se refere ao impacte do aumento da espessura do isolamento térmico no valor de ψ , ocorre uma diminuição do seu valor à medida que a espessura da parede aumenta, para os três tipos de parede referidos anteriormente. Para além disso, a variação da espessura da parede provoca um decréscimo considerável no valor de ψ , que não deve ser desprezado.

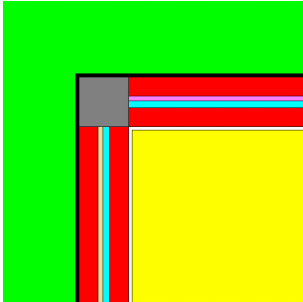
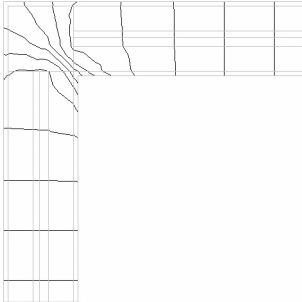
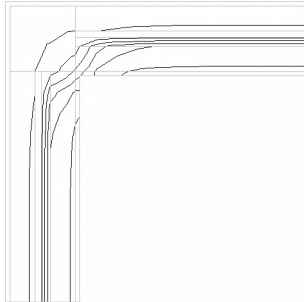
5.3.4.4 Ligação entre duas paredes verticais

i) Parede dupla com material de isolamento na caixa-de-ar

As pontes térmicas que se seguem, referentes à ligação entre duas paredes verticais, apresentam parede dupla na zona corrente da fachada, com isolamento térmico na caixa-de-ar, compreendido entre os dois panos.

Como se verifica, não está prevista qualquer correcção térmica do elemento estrutural para a ponte térmica P.T.Dr1 (Quadro 5.24).

Quadro 5.24 – Ligação entre duas paredes verticais - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Dr1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Dr1			
Tipo de parede	ψ_{BISCO} [W/m.°C]	ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,49	0,20	0,10
B	0,49	0,20	0,10
C	0,51	0,20	0,10

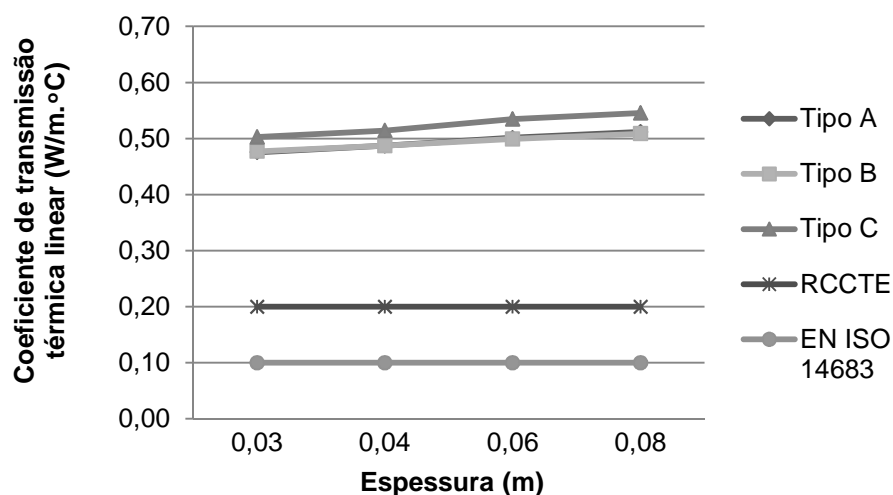
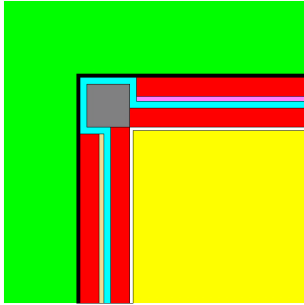
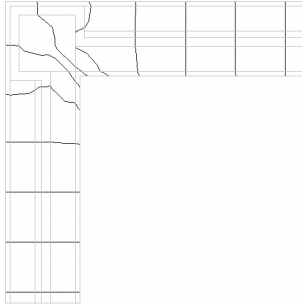
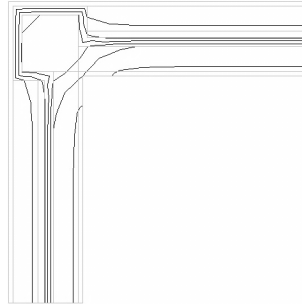


Figura 5.28 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Dr1

No caso da ponte térmica P.T.Dr2 (Quadro 5.25), a correcção térmica do elemento estrutural faz-se pelo exterior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura, de modo a garantir a sua continuidade.

Quadro 5.25 – Ligação entre duas paredes verticais - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Dr2

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Dr2			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,25	0,20	0,10
B	0,27	0,20	0,10
C	0,28	0,20	0,10

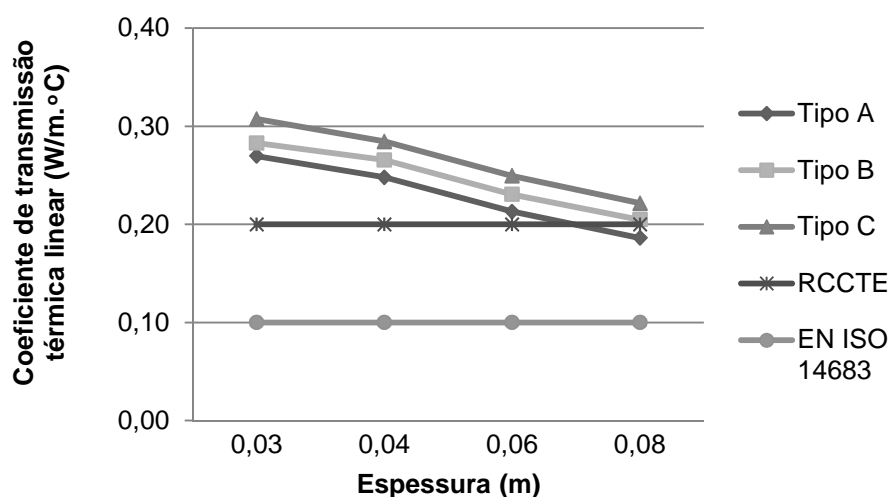
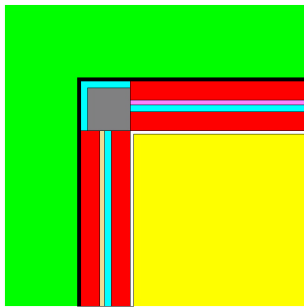
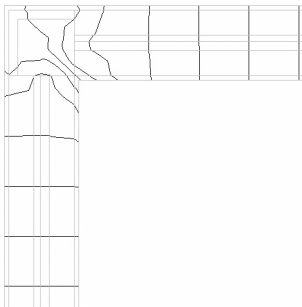
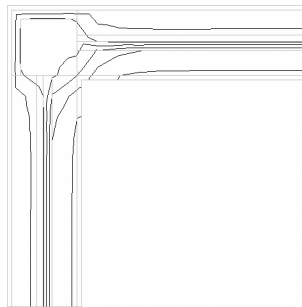


Figura 5.29 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Dr2

No caso da ponte térmica P.T.Dr3 (Quadro 5.26), a correcção térmica do elemento estrutural faz-se pelo exterior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura, contudo, não se garante a sua continuidade.

Quadro 5.26 – Ligação entre duas paredes verticais - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Dr3

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Dr3			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [$\text{W/m.}^\circ\text{C}$]	Ψ_{RCCTE} [$\text{W/m.}^\circ\text{C}$]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [$\text{W/m.}^\circ\text{C}$]
A	0,34	0,20	0,10
B	0,35	0,20	0,10
C	0,36	0,20	0,10

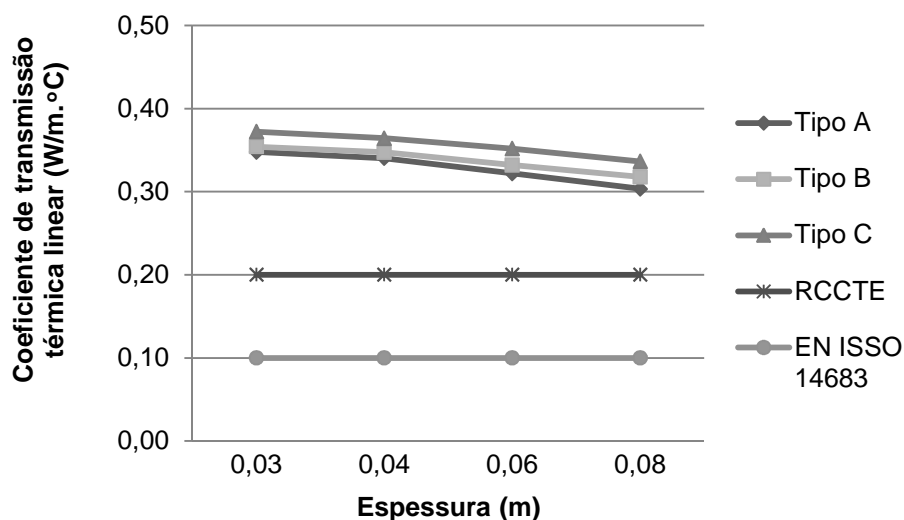
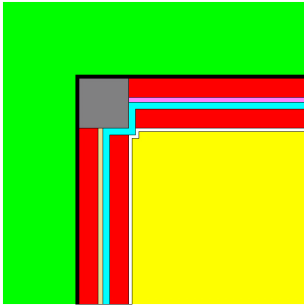
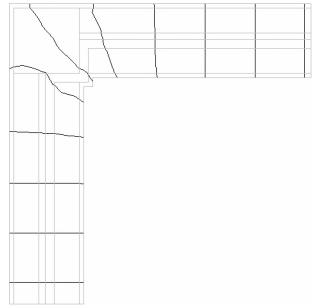
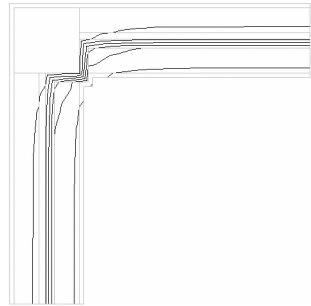


Figura 5.30 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Dr3

No caso da ponte térmica P.T.Dr4 (Quadro 5.27), a correcção térmica do elemento estrutural faz-se pelo interior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura, de modo a garantir a sua continuidade.

Quadro 5.27 – Ligação entre duas paredes verticais - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Dr4

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Dr4			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,14	0,20	0,10
B	0,15	0,20	0,10
C	0,17	0,20	0,10

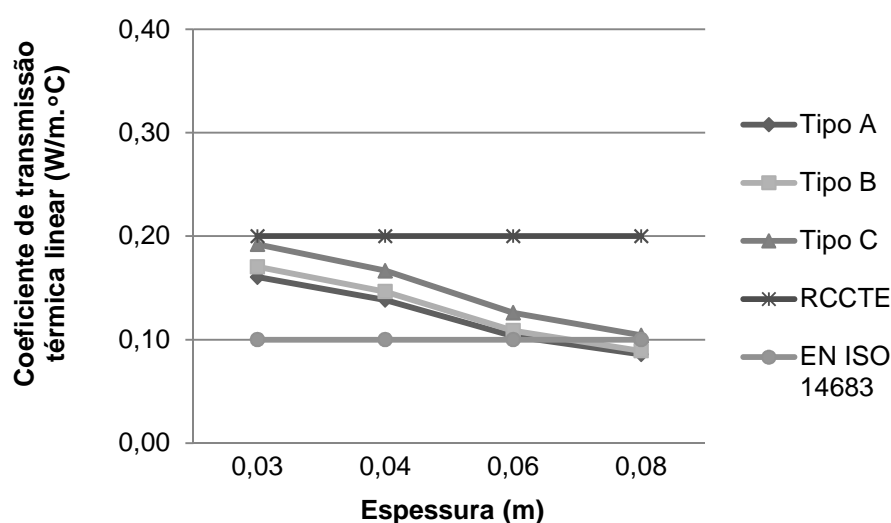


Figura 5.31 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Dr4

Depois de analisados os diversos quadros, constata-se que na zona de ponte térmica existe uma grande concentração de linhas de fluxo de calor devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), isto é, o fluxo de calor dirige-se na direcção do pilar e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, no entanto, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção das duas paredes.

Quando a correcção térmica é realizada de modo a garantir a continuidade do isolamento térmico, observa-se que existe uma menor concentração de linhas de fluxo de calor e a distribuição da temperatura é mais homogénea (P.T.Dr2 e P.T.Dr4), comparativamente aos restantes casos. Consequentemente, nestes casos, ocorre uma diminuição do valor de ψ , uma vez que as perdas térmicas são inferiores às verificadas para as soluções de correcção térmica sem continuidade do isolamento térmico (P.T.Dr1 e P.T.Dr3).

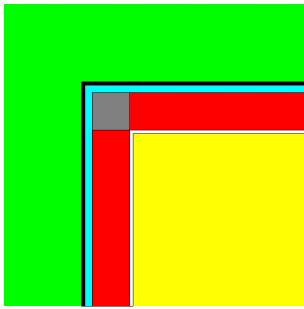
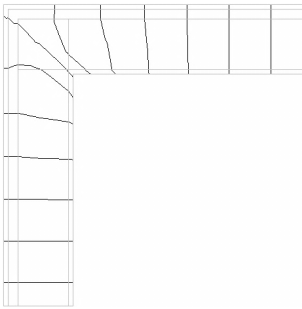
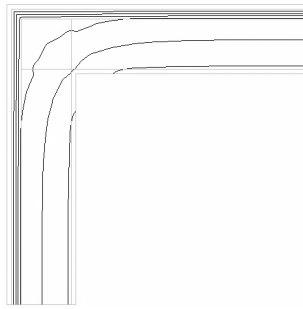
Como se constata pela ponte térmica P.T.Dr1, os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) são superiores aos valores previstos pelo RCCTE (2006) e pela EN ISO 14683 (2007), para os três tipos de parede analisadas (A, B e C), contudo, a norma europeia apresenta valores menos conservativos.

No que se refere ao impacte do aumento da espessura do isolamento térmico no valor de ψ , ocorre uma diminuição do seu valor à medida que a espessura da parede aumenta, para os três tipos de parede referidos. Para além disso, a variação da espessura da parede provoca um decréscimo no valor de ψ , embora, pouco significativo.

ii) Parede simples com isolamento pelo exterior

A ponte térmica P.T.De1 (Quadro 5.28), referente à ligação entre duas paredes verticais, apresenta parede simples na zona corrente da fachada, com isolamento térmico contínuo pelo exterior, com 4 cm de espessura, o que garante a correcção térmica do elemento estrutural (pilar).

Quadro 5.28 – Ligação entre duas paredes verticais - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.De1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.De1			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
D	0,21	0,10	0,15
E	0,23	0,15	0,15
F	0,24	0,15	0,15

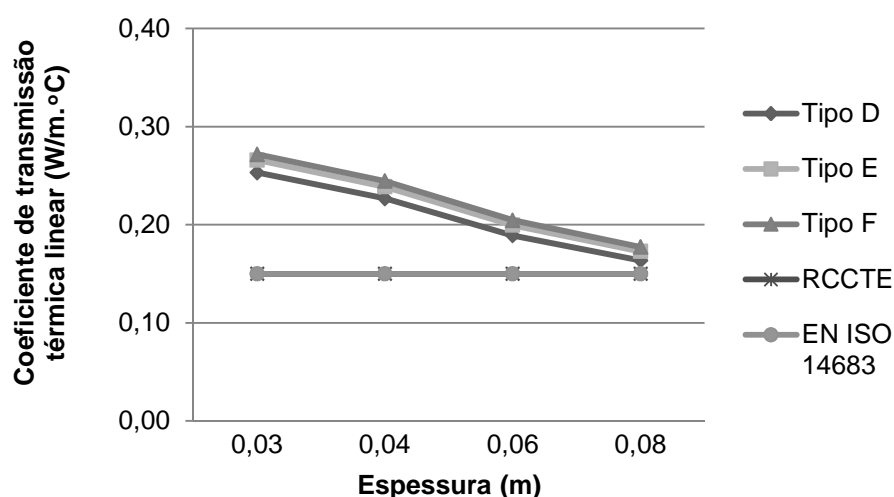


Figura 5.32 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.De1

Após observação do Quadro 5.28, constata-se que na zona de ponte térmica, devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), o fluxo de calor dirige-se na direcção do pilar e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, no entanto, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção das duas paredes.

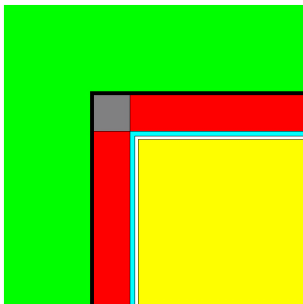
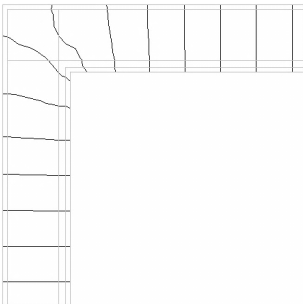
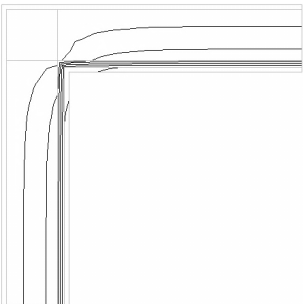
Como se verifica pela ponte térmica P.T.Bi1, os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) são semelhantes aos valores do RCCTE (2006), para os três tipos de parede analisadas (G, H e I), contudo, o regulamento português apresenta valores mais baixos, logo, é menos conservativo.

Da análise gráfica (Figura 5.32), constata-se que o aumento da espessura do isolamento térmico provoca uma diminuição do valor ψ , para os três tipos de parede referidos. Para além disso, a variação da espessura da parede provoca um decréscimo no valor de ψ , porém, pouco significativo.

iii) Parede simples com isolamento pelo interior

A ponte térmica P.T.De1 (Quadro 5.29), referente à ligação entre duas paredes verticais, apresenta parede simples na zona corrente da fachada, com isolamento térmico contínuo pelo interior, com 4 cm de espessura.

Quadro 5.29 - Ligação entre duas paredes verticais - parede simples com isolamento pelo interior - P.T.Di1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	Distribuição de temperaturas
P.T.Di1			
Tipo de parede	$\Psi_{\text{BISCO}} [\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}]$	$\Psi_{\text{RCCTE}} [\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}]$	$\Psi_{\text{ISO 14683}} [\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}]$
G	0,06	0,20	0,05
H	0,07	0,25	0,05
I	0,08	0,25	0,05

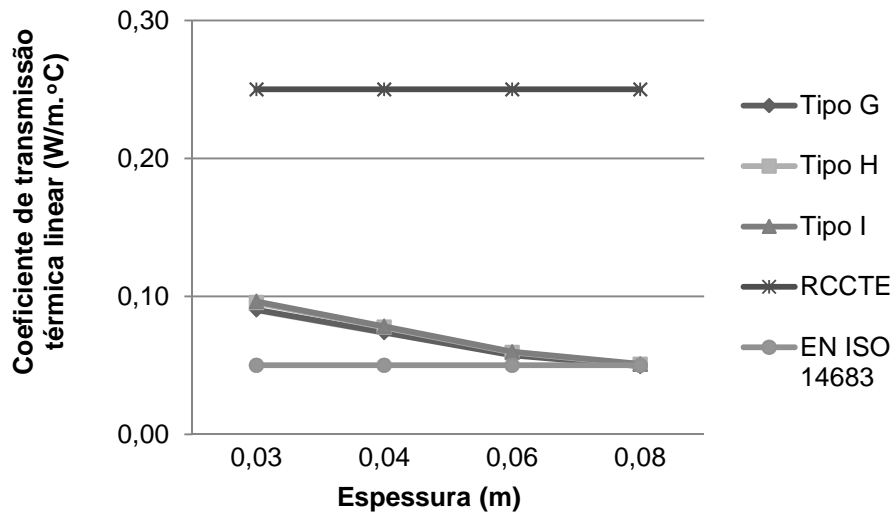


Figura 5.33 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Di1

Da análise ao Quadro 5.29, verifica-se que na zona de ponte térmica, devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), o fluxo de calor dirige-se na direcção do pilar e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, no entanto, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na zona de intersecção das duas paredes.

Como se constata pela ponte térmica P.T.Bi1, os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) são um pouco inferiores aos valores do RCCTE (2006), para os três tipos de parede analisadas (G, H e I), logo, o regulamento português é menos conservativo.

Da análise gráfica (Figura 5.33) constata-se que o aumento da espessura do isolamento térmico provoca uma diminuição do valor de ψ , para os três tipos de parede referidos. Para além disso, verifica-se que a variação da espessura da parede não se reflecte no valor de ψ .

5.3.4.5 Pilares inseridos em zonas correntes

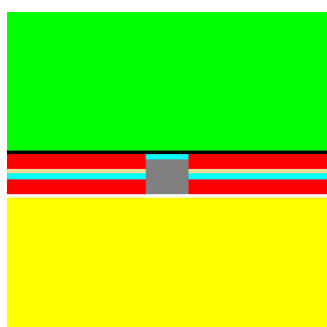
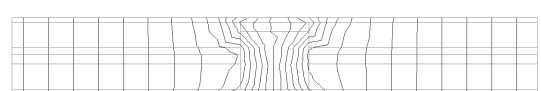

Pretende-se com o estudo destas soluções construtivas abordar uma das situações de ponte térmica plana de maior ocorrência. De acordo com o RCCTE, o coeficiente de transmissão térmica de uma ponte térmica plana não deverá ultrapassar o valor correspondente de U da(s) zona(s) adjacente(s), não havendo necessidade de apelar ao uso de um coeficiente de transmissão térmica linear ψ neste caso. Contudo, como já referido, uma ponte térmica plana constitui uma heterogeneidade que origina um acréscimo de fluxo de calor, optou-se por estimar o valor de ψ associado a esta situação, à semelhança do que é feito pela Norma Europeia EN ISO 14683 (2007), que apresenta alguns valores de ψ em função da tipologia da(s) zona(s) adjacente(s). Refira-se que a regra estipulada no RCCTE referente ao valor de U é sempre respeitada.

i) Parede dupla com material de isolamento na caixa-de-ar

As pontes térmicas que se seguem, referentes à presença de pilares em zonas correntes, apresentam parede dupla na zona corrente da fachada, com isolamento térmico na caixa-de-ar, compreendido entre os dois panos.

No caso da ponte térmica P.T.Er1 (Quadro 5.30), a correcção térmica do elemento estrutural faz-se pelo exterior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura, contudo, não se garante a sua continuidade.

Quadro 5.30 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Er1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	
P.T.Er1			
		Distribuição de temperaturas	
			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	1,01	-	1,20
B	0,98	-	1,20
C	0,98	-	1,20

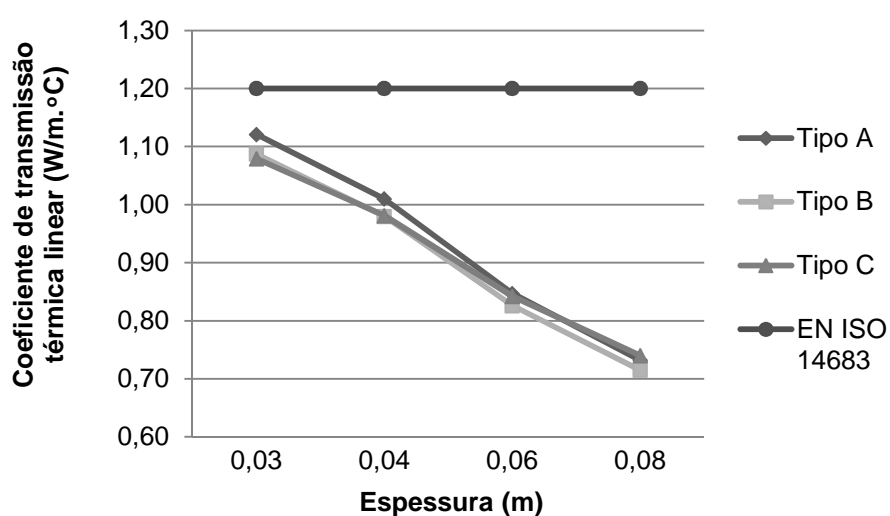
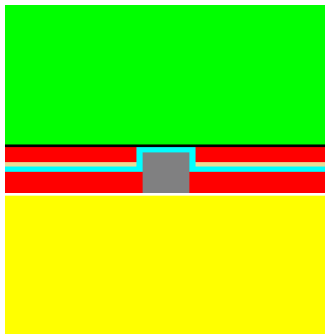
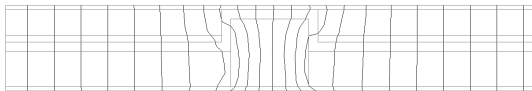
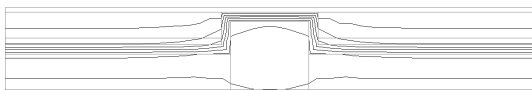


Figura 5.34 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Er1

No caso da ponte térmica P.T.Er2 (Quadro 5.31), a correcção térmica do elemento estrutural faz-se pelo exterior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura, de modo a garantir a sua continuidade.

Quadro 5.31 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Er2

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	
P.T.Er2			
		Distribuição de temperaturas	
			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,75	-	1,20
B	0,73	-	1,20
C	0,73	-	1,20

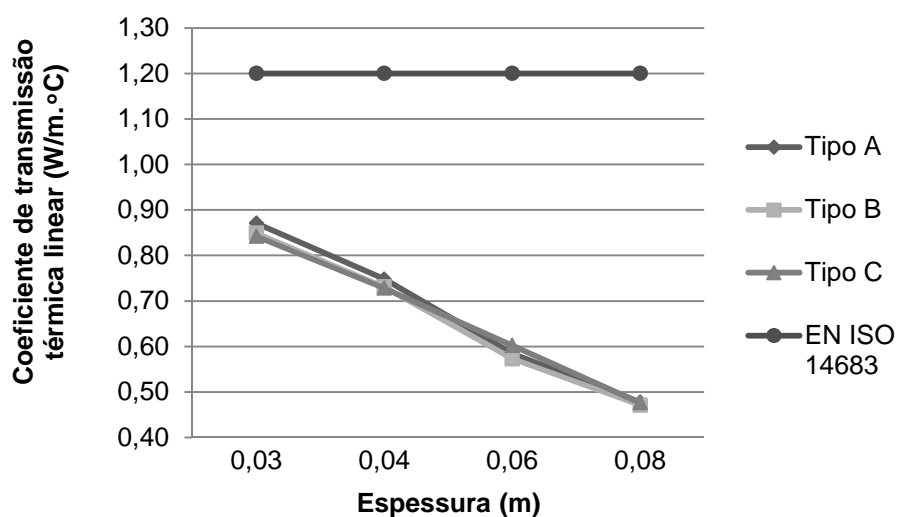
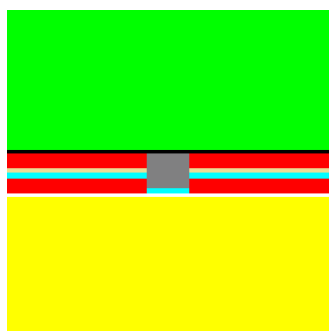
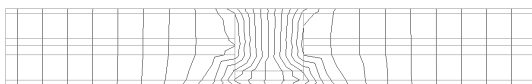
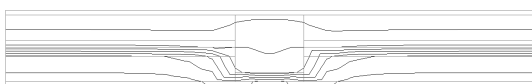


Figura 5.35 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Er2

No caso da ponte térmica P.T.Er3 (Quadro 5.32), a correcção térmica do elemento estrutural faz-se pelo interior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura, contudo, não se garante a sua continuidade.

Quadro 5.32 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Er3

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	
P.T.Er3			
		Distribuição de temperaturas	
			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	1,01	-	1,20
B	1,00	-	1,20
C	0,98	-	1,20

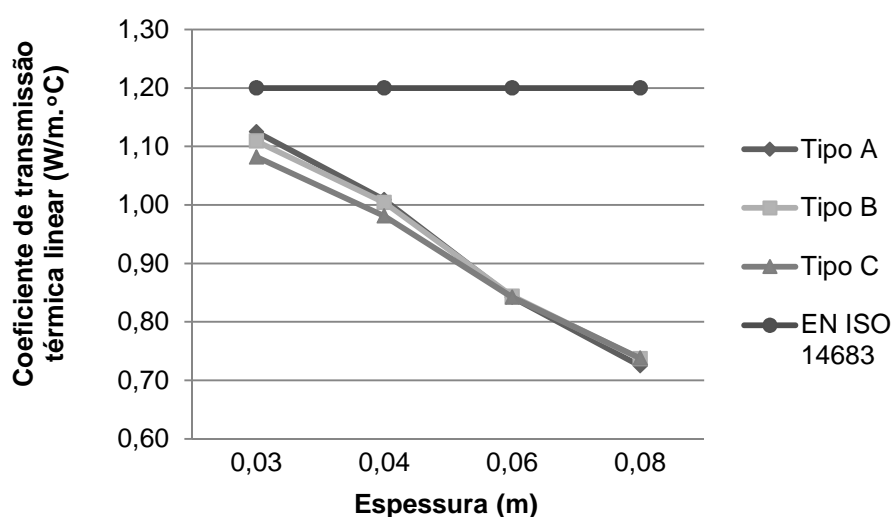
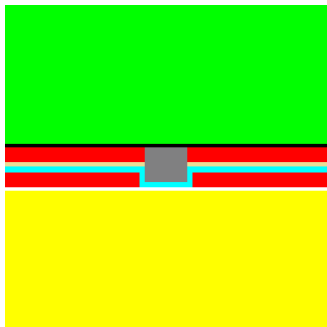
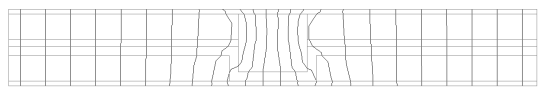
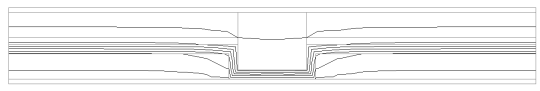
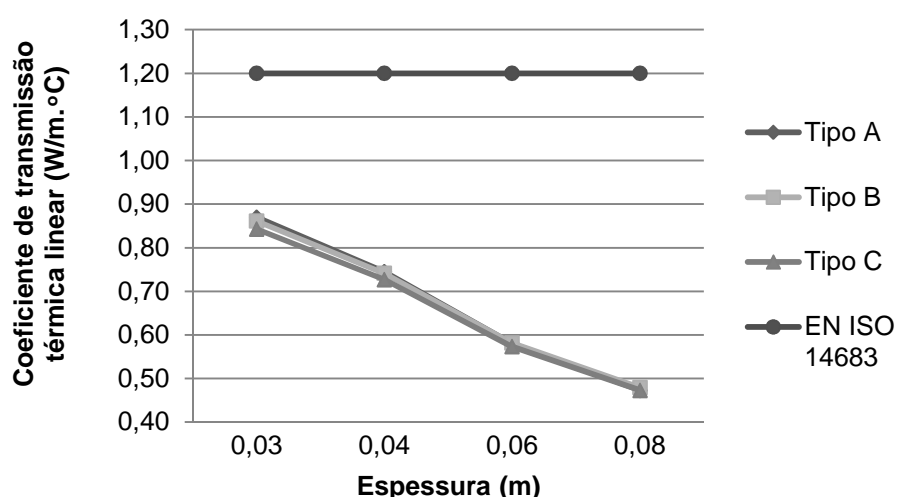


Figura 5.36 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Er3

No caso da ponte térmica P.T.Er4 (Quadro 5.33), a correcção térmica do elemento estrutural faz-se pelo interior, com a aplicação de isolamento térmico com 4cm de espessura, de modo a garantir a sua continuidade.

Quadro 5.33 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede dupla com isolamento na caixa-de-ar - P.T.Er4

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	
P.T.Er4			
		Distribuição de temperaturas	
			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
A	0,75	-	1,20
B	0,74	-	1,20
C	0,73	-	1,20


Figura 5.37 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Er4

Depois de analisados os diversos quadros, constata-se que na zona de ponte térmica existe uma grande concentração de linhas de fluxo de calor devido à presença de elementos estruturais de maior condutibilidade térmica (menor resistência térmica), isto é, o fluxo de calor dirige-se na direcção do pilar e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente fica perpendicular às linhas de fluxo de calor, contudo, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior.

Quando a correcção térmica é realizada de modo a garantir a continuidade do isolamento térmico, observa-se que existe uma menor concentração de linhas de fluxo de calor e a distribuição da temperatura é mais homogénea (P.T.Er2 e P.T.Er4), comparativamente aos restantes casos.

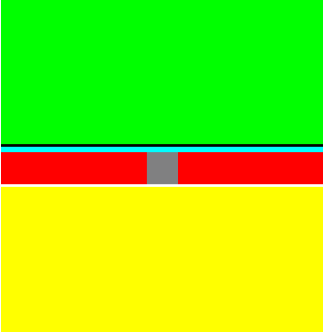
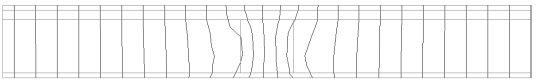
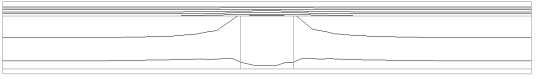
Nestes casos, ocorre uma diminuição do valor de ψ , uma vez que as perdas térmicas são inferiores às verificadas para as soluções de correcção térmica sem continuidade do isolamento térmico (P.T.Er1 e P.T.Er3).

Como se constata pela ponte térmica P.T.Dr1, os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) são inferiores aos valores previstos pela EN ISO 14683 (2007), para os três tipos de parede analisadas (A, B e C), isto é, a norma europeia apresenta valores mais conservativos. No que se refere ao impacte do aumento da espessura do isolamento térmico no valor de ψ , ocorre uma diminuição do seu valor à medida que a espessura da parede aumenta, para os três tipos de parede referidos. Para além disso, a variação da espessura da parede provoca um decréscimo no valor de ψ , embora, pouco significativo.

ii) Parede simples com isolamento pelo exterior

A ponte térmica P.T.Ee1 (Quadro 5.34), referente à presença de pilares em zonas correntes, apresenta parede simples na zona corrente da fachada, com isolamento térmico contínuo pelo exterior, com 4cm de espessura, o que garante a correcção térmica do elemento estrutural (pilar).

Quadro 5.34 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.Ee1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	
P.T.Ee1			
		Distribuição de temperaturas	
			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
D	0,84	-	1,30
E	0,73	-	1,30
F	0,73	-	1,30

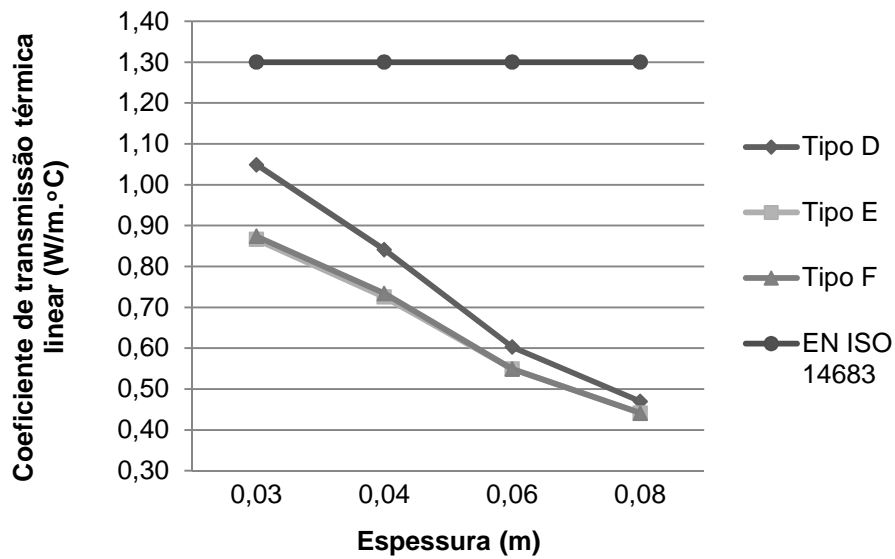


Figura 5.38 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ee1

Após a observação do Quadro 5.34, constata-se que na zona de ponte térmica, devido à presença de um elemento de menor resistência térmica (pilar), o fluxo de calor dirige-se na sua direcção e passa a apresenta componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, no entanto, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior.

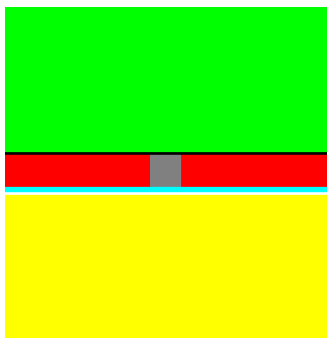
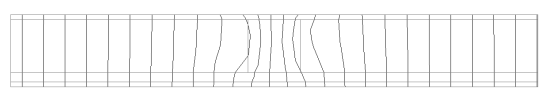

Como se verifica pela ponte térmica P.T.Ee1, os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) são inferiores aos valores da EN ISO 14683 (2007), para os três tipos de parede analisadas (D, E e F), isto é, a norma europeia apresenta valores mais conservativos.

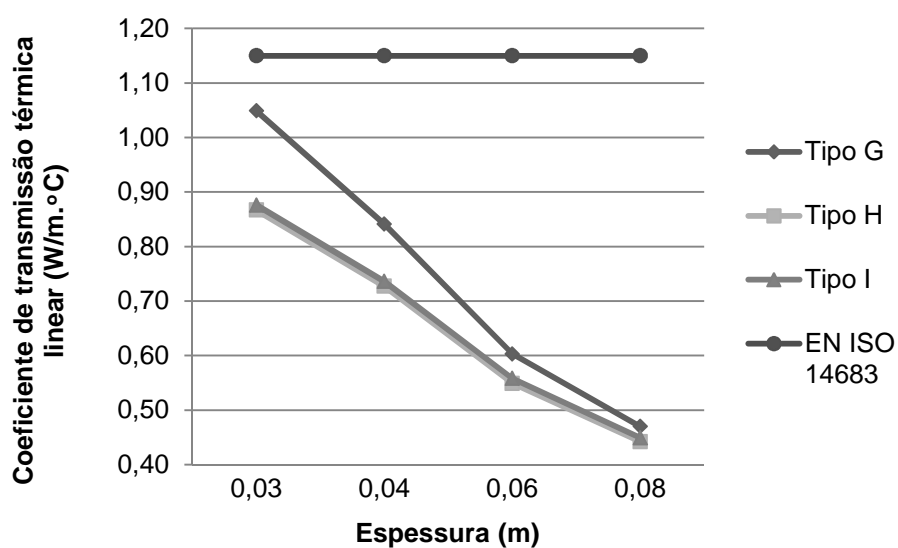
Da análise gráfica (Figura 5.38) constata-se que o aumento da espessura do isolamento térmico provoca uma diminuição do valor ψ , para os três tipos de parede referidos. Para além disso, a variação da espessura da parede provoca um decréscimo no valor de ψ , porém, pouco significativo.

iii) Parede simples com isolamento pelo interior

A ponte térmica P.T.Ei1 (Quadro 5.35), referente à presença de pilares em zonas correntes, apresenta parede simples na zona corrente da fachada, com isolamento térmico contínuo pelo interior, com 4cm de espessura.

Quadro 5.35 – Pilares inseridos em zonas correntes - parede simples com isolamento pelo exterior - P.T.Ei1

Designação	Representação esquemática	Linhas de fluxo de calor	
P.T.Ei1			
		Distribuição de temperaturas	
			
Tipo de parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{\text{ISO 14683}}$ [W/m.°C]
G	0,84	-	1,15
H	0,73	-	1,15
I	0,73	-	1,15


Figura 5.39 – Apresentação gráfica dos valores do coeficiente de transmissão térmica em função da variação da espessura de isolamento térmico - P.T.Ei1

Da análise ao Quadro 5.35, constata-se que na zona de ponte térmica, devido à presença de um elemento de menor resistência térmica (pilar), o fluxo de calor dirige-se na sua direcção e passa a apresentar componentes segundo as duas direcções.

A distribuição de temperaturas na zona corrente encontra-se perpendicular às linhas de fluxo de calor, no entanto, na zona de ponte térmica verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior.

Como se verifica pela ponte térmica P.T.Ee1, os valores de ψ obtidos através do programa de cálculo BISCO (2006) são inferiores aos valores da EN ISO 14683 (2007), para os três tipos de parede analisadas (G, H e I), isto é, a norma europeia apresenta valores mais conservativos.

Da análise gráfica (Figura 5.39) constata-se que o aumento da espessura do isolamento térmico provoca uma diminuição do valor de ψ , para os três tipos de parede referidos. Para além disso, a variação da espessura da parede provoca um decréscimo no valor de ψ , porém, pouco significativo.

5.3.5 Análise dos valores obtidos pelo BISCO para o factor de temperatura superficial (f_{Rsi})

A existência de pontes térmicas nos edifícios, como já referido no subcapítulo 2.3.1, pode provocar a ocorrência de condensações superficiais ao nível das faces interiores da envolvente. O parâmetro que permite avaliar o risco de ocorrência de condensações nos elementos construtivos, com base em condições de fronteira convencionais, designa-se por factor de temperatura superficial (f_{Rsi}), e depende essencialmente da escolha do valor de R_{si} (resistência superficial interior). Para o cálculo deste parâmetro térmico recorre-se ao programa BISCO (2006), que se rege pela Norma Europeia EN ISO 10211 (2007).

Os quadros que se apresentam de seguida traduzem a análise de possíveis correcções em zona de ponte térmica, em função do tipo de parede considerada, do posicionamento do material de isolamento térmico e do tipo de correcção térmica. Em cada quadro são apresentados os valores do factor de temperatura superficial para as soluções de ponte térmica consideradas anteriormente. Para além disso, analisam-se os valores obtidos com base no valor mínimo do factor de temperatura superficial recomendado (RODRIGUES et al. 2009) para edifícios residenciais (0,65).

Na grande maioria dos casos, constatou-se que o aumento da espessura da parede é pouco significativo no aumento do valor de f_{Rsi} . Assim, na elaboração dos quadros foi considerado somente um tipo de parede, referente à situação mais desfavorável (menor valor de f_{Rsi}), com o intuito de facilitar a visualização dos valores obtidos.

5.3.5.1 Ligação da fachada com pavimentos intermédios

O Quadro 5.36 apresenta os valores obtidos para o factor de temperatura superficial (f_{Rsi}), para os casos de pontes térmicas lineares na ligação da fachada com pavimentos intermédios.

Quadro 5.36 – Valores de factor de temperatura superficial - ligação da fachada com pavimentos intermédios

Designação		Tipo de Parede	Factor de temperatura superficial (f_{Rsi}) - BISCO
Ligação da fachada com pavimentos intermédios	P.T.Ar1	A	0,74
	P.T.Ar2	A	0,80
	P.T.Ar3	A	0,72
	P.T.Ar4	A	0,75
	P.T.Ar5	C	0,90
	P.T.Ar6	C	0,77
	P.T.Ae1	D	0,89
	P.T.Ai1	G	0,67
	P.T.Ai2	G	0,69

Da análise ao Quadro 5.36, constata-se que não existe risco de ocorrência de condensações superficiais para as correcções térmicas consideradas, pois o factor de temperatura superficial é igual ou superior ao valor mínimo recomendado (0,65). Contudo, existem correcções térmicas que apresentam valores de f_{Rsi} mais próximos do valor mínimo. O valor do factor de temperatura superficial, em geral, é mais elevado na situação em que existe continuidade do isolamento térmico (por exemplo, P.T.Ar5), logo, esta solução apresenta menor risco de ocorrência de condensações comparativamente aos casos em que verifica a descontinuidade do mesmo (por exemplo, P.T.Ar3). Para além disso, verifica-se que a solução de parede simples com isolamento pelo exterior (P.T.Ae1) apresenta valores de f_{Rsi} superiores aos obtidos quando o isolamento térmico é colocado pelo interior (por exemplo, P.T.Ai1), ou seja, a primeira solução apresenta menor risco de ocorrência de condensações.

5.3.5.2 Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço

O Quadro 5.37 apresenta os valores obtidos para o factor de temperatura superficial (f_{Rsi}), para os casos de pontes térmicas lineares na ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço.

Quadro 5.37 – Valores de factor de temperatura superficial - ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço

Designação		Tipo de Parede	Factor de temperatura superficial (f_{Rsi}) - BISCO
Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço	P.T.Br1	A	0,70
	P.T.Br2	A	0,71
	P.T.Br3	A	0,68
	P.T.Br4	A	0,80
	P.T.Be1	F	0,83
	P.T.Bi2	G	0,65

Da análise ao Quadro 5.37, verifica-se que o risco de ocorrência de condensações superficiais para as correcções térmicas consideradas é reduzido, pois o factor de temperatura superficial é igual ou superior ao valor mínimo recomendado (0,65). Contudo, à semelhança dos casos anteriores, existem correcções térmicas que apresentam valores de f_{Rsi} mais próximos do valor mínimo. O valor de f_{Rsi} , em geral, é mais elevado na situação em que existe continuidade do isolamento térmico (por exemplo, P.T.Br4), logo, esta solução apresenta menor risco de ocorrência de condensações comparativamente aos casos em que verifica a descontinuidade do mesmo (por exemplo, P.T.Br3). Para além disso, verifica-se que a solução de parede simples com isolamento pelo exterior (P.T.Be1) apresenta valores de f_{Rsi} superiores aos obtidos quando o isolamento térmico é colocado pelo interior (P.T.Bi1), ou seja, a primeira solução apresenta menor risco de ocorrência de condensações.

5.3.5.3 Ligação da fachada com varanda

O Quadro 5.38 apresenta os valores obtidos para o factor de temperatura superficial (f_{Rsi}), para os casos de pontes térmicas lineares na ligação da fachada com varanda.

Quadro 5.38 – Valores de factor de temperatura superficial - ligação da fachada com varanda

Designação		Tipo de Parede	Factor de temperatura superficial (f_{Rsi}) - BISCO
Ligação da fachada com varanda	P.T.Cr1	A	0,75
	P.T.Cr2	A	0,75
	P.T.Cr3	A	0,74
	P.T.Cr4	A	0,73
	P.T.Ce1	D	0,75
	P.T.Ci1	G	0,68

Da análise ao Quadro 5.38, constata-se que não existe risco de ocorrência de condensações superficiais para as correcções térmicas consideradas, pois o factor de temperatura superficial (f_{Rsi}) é igual ou superior ao valor mínimo recomendado (0,65). A variação da espessura da parede reflecte-se pouco no valor de f_{Rsi} , contudo, constata-se que a solução de parede simples com isolamento pelo exterior (P.T.Ce1) apresenta valores de f_{Rsi} ligeiramente superiores aos obtidos quando o isolamento térmico é colocado pelo interior (P.T.Ci1), isto é, a primeira solução apresenta menor risco de ocorrência de condensações.

5.3.5.4 Ligação entre duas paredes verticais

O Quadro 5.39 apresenta os valores obtidos para o factor de temperatura superficial (f_{Rsi}), para os casos de pontes térmicas lineares na ligação entre duas paredes verticais.

Quadro 5.39 – Valores de factor de temperatura superficial - ligação entre duas paredes verticais

Designação		Tipo de Parede	Factor de temperatura superficial (f_{Rsi}) - BISCO
Ligação entre duas paredes verticais	P.T.Dr1	A	0,60
	P.T.Dr2	A	0,75
	P.T.Dr3	A	0,69
	P.T.Dr4	A	0,87
	P.T.De1	F	0,78
	P.T.Di1	I	0,87

Da análise ao Quadro 5.39, verifica-se que, à excepção da ponte térmica P.T.Dr1, não existe risco de ocorrência de condensações superficiais para as correcções térmicas consideradas, pois o valor de f_{Rsi} é igual ou superior ao valor mínimo recomendado (0,65). A solução apresentada na ponte térmica P.T.Dr1 não prevê correcção térmica do elemento estrutural, contrariamente às restantes soluções que não apresentam risco de ocorrência de condensações superficiais. Para além disso, verifica-se que a solução de parede simples com isolamento pelo interior (P.T.Di1) apresenta, valores de f_{Rsi} um pouco superiores aos obtidos quando o isolamento térmico é colocado pelo exterior (P.T.De1), ou seja, a primeira solução apresenta menor risco de ocorrência de condensações, contrariamente ao que se apurou nos casos anteriores.

5.3.5.5 Pilares inseridos em zonas correntes

O Quadro 5.40 apresenta os valores obtidos para o factor de temperatura superficial (f_{Rsi}), para os casos de pontes térmicas referentes à presença de pilares em zonas correntes.

Quadro 5.40 – Valores de factor de temperatura superficial - pilares inseridos em zonas correntes

Designação		Tipo de Parede	Factor de temperatura superficial (f_{Rsi}) - BISCO
Pilares inseridos em paredes verticais	P.T.Er1	A	0,81
	P.T.Er2	A	0,89
	P.T.Er3	A	0,82
	P.T.Er4	A	0,91
	P.T.Ee1	D	0,91
	P.T.Ei1	G	0,90

Da análise ao Quadro 5.40, constata-se que não existe risco de ocorrência de condensações superficiais para as correcções térmicas consideradas, pois o factor de temperatura superficial (f_{Rsi}) é igual ou superior ao valor mínimo recomendado (0,65). As soluções de parede dupla em que se garante a continuidade do isolamento térmica (P.T.Er2 e P.T.Er4) apresentam valores de f_{Rsi} superiores às restantes soluções (P.T.Er1 e P.T.Er3), logo, apresentam menor risco de ocorrência de condensações. A solução de parede simples com isolamento pelo exterior (P.T.Ee1) apresenta valores de f_{Rsi} semelhantes aos obtidos quando o isolamento térmico é colocado pelo interior (P.T.Ei1).

5.3.6 Valores de ψ e de f_{Rsi} obtidos para as soluções de pontes térmicas consideradas

O quadro que se apresenta de seguida pretende resumir os valores de ψ e de f_{Rsi} obtidos através do programa BISCO (2006), da tabela A.2 da Norma Europeia EN ISO 14683 (2007) e da tabela IV.3 do RCCTE (2006), para as possíveis correcções térmicas consideradas.

Como referido, em geral, o aumento da espessura do isolamento térmico na zona de ponte térmica provoca uma diminuição do valor de ψ . No entanto, na grande maioria dos casos, também se constata que o aumento da espessura da parede é pouco significativo para a diminuição do seu valor. Assim, para o quadro resumo (Quadro 5.41) considerou-se somente um tipo de parede, referente à situação mais desfavorável (maior valor de ψ), com o intuito de facilitar a visualização dos valores.

Quadro 5.41 – Valores de ψ e de f_{Rsi} para as soluções de pontes térmicas consideradas

Designação		Tipo de Parede	Ψ_{BISCO} [W/m.°C]	Ψ_{RCCTE} [W/m.°C]	$\Psi_{EN ISO 14683}$ [W/m.°C]	f_{Rsi}
Ligação da fachada com pavimentos intermédios	P.T.Ar1	A	0,85	0,40	0,65	0,74
	P.T.Ar2	A	0,69	0,40	0,65	0,80
	P.T.Ar3	A	1,00	0,40	0,65	0,72
	P.T.Ar4	A	0,87	0,40	0,65	0,75
	P.T.Ar5	C	0,28	0,40	0,65	0,90
	P.T.Ar6	C	0,80	0,40	0,65	0,77
	P.T.Ae1	D	0,29	0,20	0,10	0,89
	P.T.Ai1	G	1,02	0,80	1,00	0,67
	P.T.Ai2	G	0,96	0,80	0,80	0,69
Ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço	P.T.Br1	A	0,69	0,60	0,70	0,70
	P.T.Br2	A	0,75	0,60	0,70	0,71
	P.T.Br3	A	0,83	0,60	0,70	0,68
	P.T.Br4	C	0,51	0,60	0,70	0,80
	P.T.Be1	D	0,35	0,45	0,25	0,83
	P.T.Bi2	G	0,78	0,75	0,85	0,65
Ligação da fachada com varanda	P.T.Cr1	A	0,80	0,90	1,05	0,75
	P.T.Cr2	A	0,87	0,90	1,05	0,75
	P.T.Cr3	A	0,93	0,90	1,05	0,74
	P.T.Cr4	A	1,00	0,90	1,05	0,73
	P.T.Ce1	D	1,05	0,90	1,05	0,75
	P.T.Ci1	G	0,96	0,90	1,00	0,68
Ligação entre duas paredes verticais	P.T.Dr1	C	0,51	0,20	0,10	0,60
	P.T.Dr2	C	0,28	0,20	0,10	0,75
	P.T.Dr3	C	0,36	0,20	0,10	0,69
	P.T.Dr4	C	0,17	0,20	0,10	0,87
	P.T.De1	F	0,24	0,15	0,15	0,78
	P.T.Di1	I	0,08	0,25	0,05	0,87
Pilares em zonas correntes	P.T.Er1	A	1,01	-	1,20	0,81
	P.T.Er2	A	0,75	-	1,20	0,89
	P.T.Er3	A	1,01	-	1,20	0,82
	P.T.Er4	A	0,75	-	1,20	0,91
	P.T.Ee1	D	0,84	-	1,30	0,91
	P.T.Ei1	G	0,84	-	1,15	0,90

Da observação do Quadro 5.41, constata-se que para as soluções de parede dupla, a correcção térmica realizada de modo a garantir a continuidade do isolamento térmico apresenta, em geral, perdas térmicas inferiores (menores valores de ψ) às verificadas para a situação de correcção térmica sem continuidade do material de isolamento. Logo, sempre que possível, é necessário evitar a descontinuidade do material de isolamento térmico, pois quanto mais isoladas forem as zonas correntes maior é a densidade do fluxo de calor através das pontes térmicas.

Para as soluções de parede simples, constata-se que quando o isolamento térmico é colocado pelo exterior provoca uma grande diminuição no valor de ψ , comparativamente à solução de isolamento térmico pelo interior, nomeadamente na ligação da fachada com pavimentos intermédios e na ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço. Porém, verifica-se um aumento desse valor quando se trata da ligação da fachada com varanda e na ligação entre duas paredes verticais, embora não haja tanta discrepância entre os valores obtidos para as duas soluções.

Em resumo, verifica-se que os valores de ψ tabelados na Norma Europeia EN ISO 14683 (2007) e no RCCTE (2006) têm, em geral, a mesma ordem de grandeza que os valores obtidos através do programa BISCO (2006). Contudo, o RCCTE (2006) apresenta, em geral, valores menos conservativos que os obtidos por análise numérica ou com recurso à norma europeia referida.

Em relação ao factor de temperatura superficial interior f_{Rsi} , constata-se que não existe risco de ocorrência de condensações superficiais para as correcções térmicas consideradas, à excepção da ponte térmica P.T.Dr1 que apresenta um valor de f_{Rsi} superior ao valor mínimo recomendado (0,65).

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Principais conclusões

Ao longo do presente trabalho, foram analisados detalhadamente e comentados diversos aspectos relacionados com as pontes térmicas provocadas pelas heterogeneidades nas envolturas dos edifícios correntes. Pretende-se, de seguida, concluir sobre os principais resultados do trabalho identificando as futuras linhas de investigação associadas.

Como se verifica no capítulo 2, a presença de pontes térmicas na construção corrente é uma constante e está na origem de diversas anomalias, tais como, o aparecimento de condensações superficiais, desenvolvimento de bolores e degradação de revestimentos. Logo, é indispensável uma análise cuidada do fenómeno, de forma a aprofundar o seu conhecimento de modo identificar as medidas adequadas para minimizar o seu efeito. Para além disso, mostrou-se que a necessidade em realizar essa análise é reconhecida e está patente nos vários trabalhos que têm vindo a ser desenvolvidos, sobretudo, nos últimos anos.

O presente trabalho visa essencialmente a análise higrotérmica de possíveis correcções em zona de ponte térmica. Como se mostrou no capítulo 3, existem vários instrumentos para avaliação do problema, designadamente os métodos experimentais, numéricos e simplificados. Vários autores recorreram a estes métodos para analisar o fenómeno, no entanto, devido às enormes potencialidades dos programas de cálculo automático, a maioria dos estudos sobre pontes térmicas realizados nos últimos anos baseiam-se na análise numérica de pormenores construtivos. Assim, no presente trabalho, recorreu-se ao programa de análise numérica BISCO (2006) para avaliar higrotermicamente diferentes tipos de pontes térmicas.

Como se verifica no capítulo 5, não basta isolar termicamente os elementos das zonas correntes, ignorando o efeito das pontes térmicas, para que se obtenham valores favoráveis para o coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) e o factor de temperatura superficial (f_{Rsi}). O isolamento parcial dos elementos estruturais é, em geral, vantajoso desde que não se criem novas heterogeneidades. Logo, para além de se colocar isolamento térmico nas zonas correntes da envoltura é necessário proceder-se à correcção térmica das zonas de pontes térmicas. De forma a respeitar os requisitos mínimos regulamentares estabelecidos pelo RCCTE (2006), o aumento da espessura de isolamento térmico nestas duas zonas em simultâneo é obrigatório e provoca um decréscimo no valor de ψ , tal como foi demonstrado no presente trabalho, e é reconhecido por Santos (2007). Contudo, para alguns casos pontuais, verifica-se que esse valor permanece constante ou aumenta ligeiramente. Assim, para estas três soluções em concreto, o aumento da espessura do isolamento térmico não traz vantagens suplementares.

Como ficou demonstrado, para as soluções de parede dupla, a correcção térmica realizada de modo a garantir a continuidade do isolamento térmico apresenta perdas térmicas inferiores (menores valores de ψ) às verificadas para a situação de correcção térmica sem continuidade do material de isolamento. Logo, sempre que possível, deve evitar-se a descontinuidade do material de isolamento térmico, pois quanto mais isoladas forem as zonas correntes maior é a densidade do fluxo de calor

através das pontes térmicas, tal como foi reconhecido por vários autores (Corvacho 1987; Abreu 2004; Pessoa 2011). Para as soluções de parede simples, constata-se que quando o isolamento térmico é colocado pelo exterior provoca uma grande diminuição no valor de ψ , comparativamente à solução de isolamento térmico pelo interior, nomeadamente na ligação da fachada com pavimentos intermédios e na ligação da fachada com cobertura inclinada ou terraço. No entanto, verifica-se um aumento desse valor quando se trata da ligação da fachada com varanda e na ligação entre duas paredes verticais, embora não haja tanta discrepância entre os valores obtidos para as duas soluções referidas.

Da análise qualitativa realizada aos valores de cálculo utilizados para efeitos de avaliação do impacto das pontes térmicas, verifica-se que, em geral, os valores do coeficiente de transmissão térmica linear (ψ) tabelados na Norma Europeia EN ISO 14683 (2007) e no RCCTE (2006) são da mesma ordem de grandeza dos valores obtidos através do programa BISCO. Contudo, o RCCTE apresenta, em geral, valores de ψ menos conservativos que os obtidos por análise numérica e com recurso à norma europeia.

Em soluções que apresentem zonas com diferentes resistências térmicas, existem diferentes temperaturas superficiais ao nível do paramento interior. Como se constata, nas zonas de pontes térmicas verifica-se uma diminuição da temperatura superficial interior, nomeadamente na intersecção dos elementos construtivos, o que pode levar ao aparecimento de diversas anomalias (por exemplo, condensações superficiais localizadas). Ainda assim, verifica-se que o risco de ocorrência de condensações superficiais para as correcções térmicas consideradas é reduzido, à excepção da situação referida no decorrer do trabalho. Como se apurou, nas soluções de parede dupla, os valores de f_{Rsi} são, em geral, mais elevados nas soluções em que existe continuidade do isolamento térmico, logo, esta solução apresenta menor risco de ocorrência de condensações comparativamente aos casos em que se verifica a descontinuidade do mesmo. Quanto às soluções de parede simples, constata-se que a aplicação de isolamento térmico pelo exterior apresenta, em geral, valores de f_{Rsi} superiores aos obtidos quando este é colocado pelo interior, à excepção da ponte térmica linear na ligação entre duas paredes verticais. Logo, a primeira solução apresenta menor risco de ocorrência de condensações superficiais do que a segunda.

Após a análise das várias soluções propostas, constata-se que os valores de ψ que constam no RCCTE (2006) aproximam-se, em geral, dos valores reais obtidos através da análise numérica, o que por si só, pode conduzir a uma avaliação aproximada do impacto das pontes térmicas lineares no desempenho energético dos edifícios. Assim, verifica-se que a análise numérica cuidada permite estimar a influência das pontes térmicas lineares com grande precisão, podendo os valores de ψ servir de base à análise do comportamento térmico dos edifícios.

Com a realização do presente trabalho, verifica-se que o aumento da espessura do isolamento térmico numa solução de parede simples ou parede dupla provoca, em geral, uma diminuição nas perdas de calor através da envolvente dos edifícios. Como tal, num futuro próximo, o recurso a soluções de parede com camadas de isolamento térmico mais espessas é uma prática que tende a generalizar-se.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Para finalizar, resta apenas referir os aspectos que, na sequência deste trabalho, podem vir a ser desenvolvidos. Para além das soluções utilizadas correntemente nos edifícios portugueses, ao longo dos últimos anos, seria interessante analisar soluções menos convencionais, cuja divulgação em Portugal tem vindo a crescer, nomeadamente as soluções de isolamento térmico pelo exterior em fachadas ventiladas, soluções de isolamento e correcção de pontes térmicas em intervenções de reabilitação de edifícios antigos com recurso a novos materiais de isolamento, etc..

Como já referido, ao longo do trabalho não foi possível analisar todas as soluções de pontes térmicas existentes, pelo que o estudo debruçou-se apenas sobre alguns casos. Contudo, é conveniente fazer um levantamento exaustivo de todos os casos de pontes térmicas lineares presentes na prática construtiva portuguesa, e à semelhança do que foi feito no presente trabalho, analisá-los higrotermicamente com recurso a um programa de análise numérica.

A elaboração de um catálogo de pontes térmicas, como se constatou, deve compreender o maior número de soluções possíveis, para fornecer aos projectistas a informação necessária sobre o seu comportamento térmico, de modo a permitir-lhes uma escolha conscienciosa das soluções construtivas a adoptar. Como tal, antes de se pensar em adaptar o catálogo de pontes térmicas às soluções de correcção térmica analisadas, seria conveniente proceder à sua avaliação prática, adoptando-as em novos projectos de edifícios, acompanhando a sua execução e verificando o seu comportamento a longo prazo.

Em Portugal, como se apurou, a legislação não prevê um valor mínimo para o factor de temperatura superficial f_{Rsi} , no entanto, existem algumas recomendações que dependem do tipo de edifício ou utilização (Rodrigues et al. 2009). Assim, seria útil, não só para o estudo das pontes térmicas mas também para a análise do comportamento da envolvente, ajustar os critérios de avaliação do risco de ocorrência de condensações superficiais e definir exigências daí decorrentes, isto é, estabelecer um valor mínimo para o parâmetro térmico f_{Rsi} , à semelhança do que já acontece em alguns países.

BIBLIOGRAFIA

ABREU, Maria I. – *Reabilitação de pontes térmicas em intervenções de reabilitação*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003.

AELENEI, Daniel – *Sebenta de Física das Construções*. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, 2010.

BARREIRA, Eva - *Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higrotérmico dos edifícios*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004.

BISCO, Computer program to calculate two-dimensional steady state heat transfer in free form objects. s.l. : Physibel, 2006.

CASTRO, João – *Quantificação dos coeficientes de transmissão térmica linear – pontes térmicas*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

CORREIA, Tiago – *Avaliação do impacte das pontes térmicas no desempenho térmico dos edifícios do Campus da FCT/UNL – análise numérica*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.

CORVACHO, Maria H. – *Estudo das pontes térmicas na envolvente dos edifícios*. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1987.

CORVACHO, Maria H. – *Pontes térmicas, análise do fenómeno e proposta de soluções*. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1996.

DECRETO-LEI nº 78/2006 de 4 de Abril. Sistema Nacional de Certificação Energética e da Qualidade do Ar Interior nos Edifícios (SCE).

DECRETO-LEI nº 79/2006 de 4 de Abril. Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização em Edifícios (RSECE).

DECRETO-LEI nº 80/2006 de 4 de Abril. Regulamento das Características de Comportamento Térmico de Edifícios (RCCTE).

DELTAG [Online]. Disponível em: <http://www.deltag.it/termografia/B4.htm> [Acesso em 28/08/2012].

DGEG [Online]. Disponível em: <http://www.dgeg.pt/> [Acesso em 13/09/2012].

DIRECTIVA 2010/31/CE DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 19/05/2010 relativa ao desempenho energético de edifícios (reformulação), Jornal Oficial da União Europeia (18/06/2010) págs. L153/13-L153/35, 2010.

EN ISO 10077-2 – *Thermal performance of windows, doors and shutters. Calculation of thermal transmittance* – Part 2: Numerical method for frames. Brussels, 2003.

EN ISO 10211-1 – *Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures* – Part 1: General calculation methods. Brussels, 1995.

EN ISO 10211-2 – *Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures* – Part 2: Detailed calculations. Brussels, 2007.

EN ISO 13370 – *Thermal performance of buildings – Heat transfer via the ground – Calculation methods*. Brussels, 2007.

EN ISO 13790 – *Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling*. Brussels, 2008.

EN ISO 14683 – *Thermal bridges in building construction. Linear thermal transmittance – Simplified methods and default values*. Brussels, 2007.

EN ISO 6946 – *Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation method*. Brussels, 2003.

ENGENHARIA CIVIL [Online]. Disponível em: <http://www.engenhariacivil.com/controlo-humidade-condensacao-interiores> [Acesso em 09/08/2012].

FREITAS, Vasco – *Implicações construtivas no novo RCCTE na concepção de paredes de alvenaria*. Seminário sobre paredes de alvenaria P.B. Lourenço et al, 2007.

HENRIQUES, Fernando M. A.- *Humidade em paredes*. Lisboa, LNEC, 2007.

JANSSENS, A. et al – *Development of limits for the linear thermal transmittance of thermal bridges in buildings. Thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings X*. International conference, Clearwater, Florida. ASHRAE, 2007.

KALAMEES, T. – *Hygrothermal criteria for design and simulation of buildings*. Thesis, Tallinn University of Technology, 2006.

KNAUF INSOLUTION [Online]. Disponível em: www.knaufinsulation.pt [Acesso em 26/01/2012].

LARBI, A. Ben – *Statistical modeling of heat transfer for thermal bridges of buildings*. France, Energy and Building, Volume 37, págs. 945-951, 2005.

LOMBARDI, Carla - *Thermal modelling, IEA Annex XIV - Condensation and Energy*, Turim, Itália, 1990.

RODRIGUES, António et al. – *Térmica de edifícios*, Orion. Lisboa, 2009.

ROULET, Claude-Alain – *Santé et qualité de l'environnement intérieur dans les bâtiments*. Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2004.

SANTOS, Carlos e MATIAS, Luís – *Coeficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios – ITE50*. Lisboa: LNEC, 2007.

SANTOS, Carlos P. – *Evolução das soluções de paredes face a novas exigências regulamentares*. Seminário sobre paredes de alvenaria P.B. Lourenço et al. (eds), 2007.

SILVA, Pedro – *Análise do comportamento térmico de construções não convencionais através de simulação em VisualDOE*. Escola de Engenharia da Universidade do Minho, 2006.

STANDAERT, P. – *Thermal bridges: a two-dimensional and three-dimensional transient thermal analysis, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings III*, Florida, 1985.

VALÉRIO, Jorge – *Avaliação do impacto das pontes térmicas no desempenho térmico e energético de edifícios residenciais correntes*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2007.

WEBER [Online]. Disponível em: www.weber.com.pt [Acesso em 19/01/2012].

WOUTERS, P. et al. – *Practical guide for the hygrothermal evaluation of thermal bridges – Save-Kopractice – Project document*, 2003.